



Vindatlas for Danmark

(Beregning af vindmøllers energiproduktion. Vindmæssige forhold)

Lundtang Petersen, Erik; Troen, I.; Frandsen, Sten Tronæs

Publication date:
1980

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Lundtang Petersen, E., Troen, I., & Frandsen, S. T. (1980). *Vindatlas for Danmark: (Beregning af vindmøllers energiproduktion. Vindmæssige forhold)*. Forsøgsanlæg Risø.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

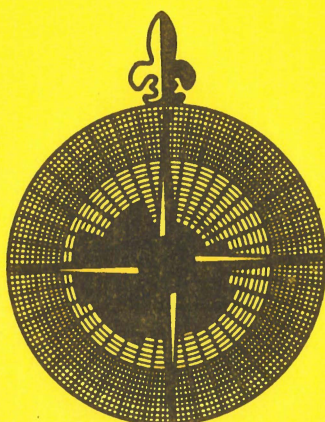
- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

RISØ

Vindatlas for Danmark

Erik Lundtang Petersen, Ib Troen og Sten Frandsen



Forskningscenter Risø, 4000 Roskilde, Danmark
September 1986

VINDATLAS FOR DANMARK

(Beregning af vindmøllers energiproduktion. Vindmæssige forhold)

af

Erik Lundtang Petersen, Ib Troen og Sten Frandsen
Fysikafdelingens Meteorologisektion
Forsøgsanlæg Risø

i samarbejde med

Energiministeriets og Elværkernes Vindkraftprogram

August 1980

Genoptrykt i uændret form september 1986

ISBN 87-550-0702-3

Grafisk Service, Risø 1986

INDHOLDSFORTEGNELSE

	Side
FORORD	5
1. ANVENDELSE AF VINDATLAS FOR DANMARK	7
2. RUHEDSKLASSIFICERING OG VALG AF MØLLEPLACERING	9
2.1. Terræntyper og ruhedsklasse	9
2.2. Generelt om placering og produktionsberegning.	10
2.3. Retningssektorerens energiindhold	13
2.4. Læ	14
2.5. Indflydelse af specielle ruhedsområder	17
2.6. Topografi	18
2.7. Ruhedsklassificering af et terræn	21
2.7.1. Ruhedsklasse 0. Vandområder	22
2.7.2. Ruhedsklasse 1. Åbne landområder uden væsentlig beplantning og bebyggelse ...	22
2.7.3. Ruhedsklasse 2. Landbrugsområder med spredt bebyggelse og hegn med en gen- snitsafstand på 1000 meter	22
2.7.4. Ruhedsklasse 3. Samlede bebyggelser, skove og landbrugsområder med mange hegn	22
2.8. Ruhedsbestemmelse af terrænet omkring en mølle	25
3. BEREGNING AF MIDDELENERGIPRODUKTION	27
3.1. Weibull parameter kurveblade	27
3.2. Bestemmelse af sandsynligheden for en given vindhastighed	28
3.3. Bestemmelse af totale middeleffekt	31
3.4. Bestemmelse af Weibull fordelingen ved skiftende ruhed	33
3.5. Bestemmelse af en vindmølles middeleffekt	38
3.5.1. Effektsandsynlighedskurven	43
3.5.2. Totale effektsandsynlighedskurve	46
3.6. Skift af ruhedsklasse inden for en eller flere sektorer	47

	Side
3.7. Bestemmelse af middeleffekt. Valg af mølle- parametre	55
3.7.1. Maksimalisering af middelfproduktion ...	56
3.7.2. Metodens anvendelse ved forstudier	62
SYMBOLLISTE	65
APPENDIKS	66
A. Weibull parameter kurver og tabeller	66
B. Samtidighed og varighed	111
C. Elementer af det fysiske og statistiske grundlag ..	117
D. Sammenligninger mellem beregnede og observerede hyppighedsfordelinger	136
E. Årstidsvariation af energiproduktion	149

FORORD

"Vindatlas for Danmark" er en metode til at bestemme vindens hyppighedsfordeling i en given højde over et givet specificeret terræn.

Da en given vindmølles middelenenergiproduktion kun afhænger af vindens hyppighedsfordeling, er Vindatlasset også en metode til beregning af middelenenergiproduktionen af en given vindmølle anbragt i et givet specificeret terræn.

Forsøgsanlæg Risø og Meteorologisk Institut udførte i 1978-1980 for Energiministeriets og Elværkernes Vindkraftprogram en vindklimatologisk undersøgelse med sigte på en vurdering af danske vindressourcer i forbindelse med anvendelse af vindkraftanlæg i Danmark. Resultatet af undersøgelsen blev fastlæggelsen af ovennævnte metode, og kontraktrapporten, der udkom i maj 1980 i et begrænset oplæg, havde titlen "Vindatlas for Danmark". Den store interesse, der blev vist arbejdet fra mange sider, antydede at kontraktrapporten i en revideret udgave ville have en bred kreds af brugere. Risø har derfor udarbejdet den foreliggende version af "Vindatlas for Danmark", der adskiller sig fra kontraktrapporten på en række punkter. Specielt er afsnittene omhandlende ruhedsbestemmelse og beregning af læffekt blevet revideret, og Weibull parametrene svarende til ruhedsklasse 0 (vandoverflader) samt metoden til beregning af indflydelsen af terrænskit indenfør en enkelt vindretningssektor er blevet ændret.

Den foreliggende version af "Vindatlas for Danmark" er udarbejdet af Forsøgsanlæg Risø og udgivet i samarbejde med Energiministeriets og Elværkernes Vindkraftprogram. Ved udarbejdelsen af kontraktrapporten deltog en række personer på Risø og Meteorologisk Institut. Klaus Hedegaard fra Vejrtjenesten var ansvarlig for Meteorologisk Instituts del af arbejdet, hvilket bestod i indsamling af trykdata, udførelse af trykanalysen samt indsamling af meteorologiske data fra synopstationerne.

Projektet modtog velvillig assistance fra vejrtjenesterne på flyvestationerne samt de meteorologiske tjenester i Norge, Sverige, Vesttyskland, Østtyskland og Polen.

Det er vort håb, at "Vindatlas for Danmark" vil være et nyttigt værktøj ved projektering af vindkraftanlæg samt ved anvendelser, hvor det er nødvendigt at kende vindens hyppighedsfordeling.

Vi vil være taknemmelige for at blive delagtiggjorte i fejl, som læseren måtte finde, det være sig matematiske fejl, udladelsesfejl, logiske fejl eller andre fejl.

Vi modtager gerne forslag til forbedring af Vindatlasset, samt hører meget gerne om resultater, positive som negative, hvor Vindatlasset har været anvendt i konkrete projekter.

Forfatterne

Risø, august 1980

1. ANVENDELSE AF VINDATLAS FOR DANMARK

Formålet med Vindatlas for Danmark er at gøre det muligt for en bruger uden speciel meteorologisk eller teknisk baggrund at bestemme vindens hyppighedsfordeling (sandsynlighedstæthedsfunktion). Brugeren bør holde sig for øje, at Vindatlasset er udarbejdet med sigte på anvendelser indenfor vindenergi. Ønsker man specielt at se på formen af vindens hyppighedsfordeling for meget små eller meget store vindhastigheder, bevæger man sig ud over gyldighedsområdet for de fysiske og statistiske metoder, der er anvendt til at opbygge Vindatlasset. Vi vil dog mene, udfra de erfaringer vi har fået under udarbejdelsen af Vindatlasset, at man med forsigtighed kan anvende de beregnede hyppighedsfordelinger for såvel lave som høje vindhastigheder. Det fremgår da også af appendiks D, hvor beregnede og målte hyppighedsfordelinger er sammenlignet, at der er en udmærket overensstemmelse ved alle vindhastigheder.

En anden begrænsning ligger i det geografiske område, indenfor hvilket Vindatlasset kan anvendes. Området er vist på fig. C2 i appendiks C, hvorefter det fremgår, at den ikke helt kystnære del af Nordsøen ligger udenfor, hvorfor Vindatlasset ikke uden videre kan anvendes til beregning af off-shore vindenergiproduktioner i Nordsøen.

Kapitlerne 2 og 3 udgør den egentlige brugervejledning. Af hensyn til helheden forekommer der matematiske udtryk, der kan virke afskrækkende på den ikke-matematisk kyndige læser. Læseren kan roligt springe de matematiske udtryk over - når beregningerne skal udføres, kræves der kun tabelopslag og simple udregninger.

Appendiks A hører sammen med kapitlerne 2 og 3, idet dette appendiks indeholder de for beregningerne nødvendige kurveblade og tabeller. De øvrige appendiks er medtaget for de læsere, hvis interesse for vindkraftproduktion rækker ud over beregning af en specifik vindmølles middelenenergiproduktion. Samtidigheds- og varighedsanalysen i appendiks B er relevant i forbindelse med

vurdering af forsyningssikkerheden og værdien af henholdsvis geografisk spredning af møller koblet til elnettet og værdien af at kombinere vindkraftgeneratorer med lagringsfaciliteter. Det skal dog bemærkes, at en detaljeret analyse af kombinerede systemer og generatorer, lagre og eventuelt tidsafhængig forbrugsbelastning kun er mulig ved hjælp af regnemaskinesimuleringer af systemerne ved brug af lange dataserier af vindhastigheden. I appendiks C er kort beskrevet nogle af elementerne i de fysiske og statistiske metoder, der har været anvendt ved udarbejdelsen af Vindatlasset. Appendiks D viser en række sammenligninger mellem beregnede og observerede hyppighedsfordelinger. Det er i hvert enkelt tilfælde beskrevet, hvorledes det betragtede terræn er blevet ruhedsbestemt, og appendiks D kan derfor også opfattes som en eksempelsamling hørende til kapitlerne 2 og 3.

Den anvendte hyppighedsfordeling er den såkaldte Weibull fordeling, der måske ikke er alle læsere bekendt, men som det fremgår af appendiks D, fremtræder den ofte som en skæv normalfordeling (Gauss fordeling). Det matematiske udtryk for Weibull fordelingen indeholder exponentialfunktionen, der overalt i Vindatlasset er udtrykt som $\exp(x)$.

2. RUHEDSKLASSIFICERING OG VALG AF MØLLEPLACERING

2.1. Terræntyper og ruhedsklasser

Forhindringer i terrænet som skove, træer, hegn og bygninger yder modstand mod vinden, og bevirker at vinden er svagere bag forhindringerne. Man siger derfor, at en forhindring er et lægivende element. Et stykke bag en lægiver genvinder vinden sin styrke, og læeffekten er forsvundet. Den samlede bremsende virkning på vinden fra terrænets overflade og de lægivende elementer i terrænet benævnes terrænets ruhed. En yderligere forklaring af begrebet ruhed er givet i appendiks C. Ud fra typen af de ruhedsdannende elementer kan man ruhedsklassificere forskellige typer af terræn. Vi har valgt at opdele det danske landskab i fire ruhedsklasser, som det er vist i tabel 2.1. I tabellen er vist energien beregnet for højden 50 meter over terræn. Tallene er relative, idet energien for vandområder er sat til 10. Det ses, hvor afgørende ruheden af et terræn er for terrænets egnethed for vindenergiproduktion.

Tabel 2.1. Terræntyper og ruhedsklasser.

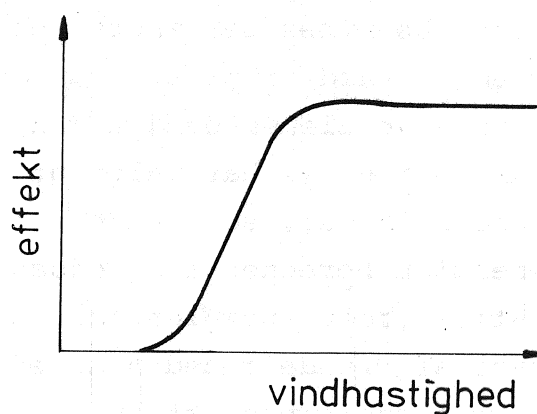
Ruheds- klasse	Terræntype	Ruheds- længde	Relativ energi
0	- vandområder.	0-1 mm	10
1	- bedste indland (åbne land- områder uden væsentlig beplantning og bebyggelse).	1 cm	7
2	- landbrugsområder med spredt bebyggelse og hegn med en gennemsnitsafstand på 1000 m.	5 cm	5
3	- samlede bebyggelser, skove og landbrugsområder med mange hegn.	30 cm	3

2.2. Generelt om placering og produktionsberegning

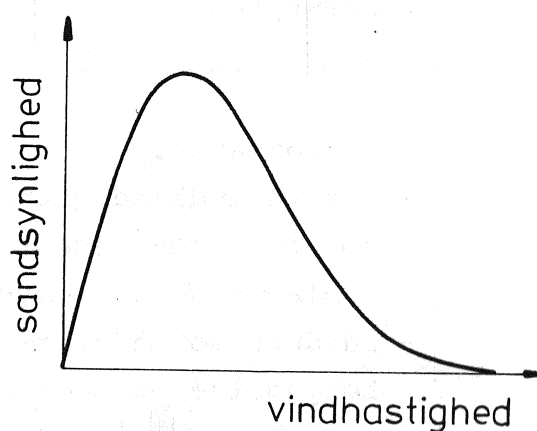
Under placeringsovervejelserne vil det ofte være tilrådeligt, at der udvælges et antal mulige placeringer, og at der for hver placering foretages en produktionsberegning.

For en udvalgt placering kan møllens middelenergiproduktion beregnes, hvis følgende størrelser kendes:

Møllens effektkurve

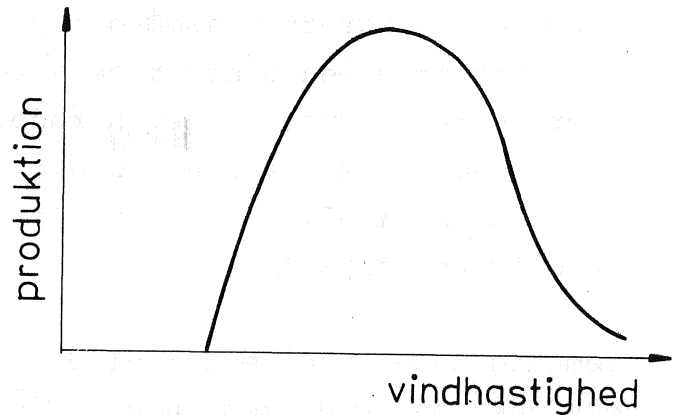


Vindens sandsynligheds-
tæthedsfordeling
(hyppighedsfordeling)
i navhøjde



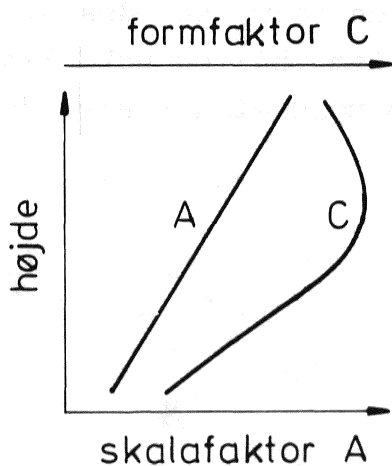
Ved at gange de to kurver sammen fås

Møllens produktionskurve

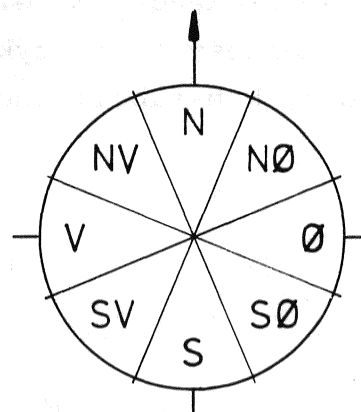


og arealet under denne kurve er lig møllens middelenenergiproduktion.

Sandsynlighedstæthedsfunktionen er beskrevet i appendiks C og møllens effektkurve er beskrevet i afsnit 3.5. Effektkurven må vi forudsætte leveret af møllefabrikanten, og vor opgave er da at bestemme vindens sandsynlighedstæthedsfunktion i navnhøjde. Dette gøres ved blandt andet at udnytte, at vindens sandsynlighedstæthedsfunktion med meget god tilnærmelse følger den såkaldte Weibull fordeling. Denne fordeling er beskrevet ved to parametre - en skalafaktor A , og en formparameter C .



Weibull parametrenes variation med højden



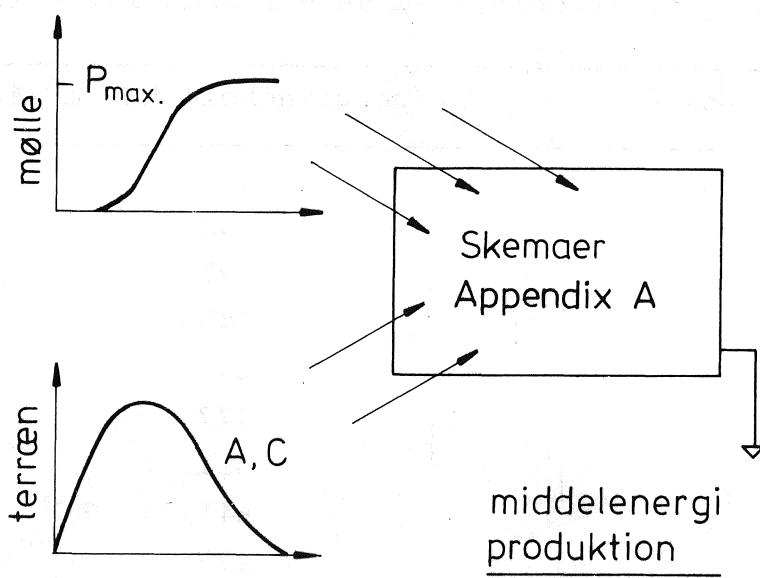
Sektorinddeling

Ud fra kurvebladene i appendiks A kan A og C bestemmes i en given højde over jordoverfladen på et givet sted i Danmark. På kurvebladene er vist, hvorledes A og C varierer med højden for en bestemt vindretningssektor og en bestemt ruhedsklasse. Da vi har valgt at arbejde med 8 sektorer á 45° og 4 ruhedsklasser, giver dette 32 kurveblade. Herudover er der et kurveblad for hver ruhedsklasse beregnet under forudsætning af, at ruheden er den samme i alle sektorer. Der er således i alt 36 kurveblade i appendiks A.

Fremgangsmåden ved bestemmelse af vindens sandsynlighedstæthedsfunktion og dermed en given vindmølles middelenenergiproduktion er som følger:

- 1) Ruhedsklassen for hver af de 8 retningssektorer bestemmes.
- 2) Af de 36 kurveblade vælges de kurveblade, der svarer til ovennævnte ruhedsklassificering. Skifter terrænet ruhed med sektorretningen vælges 8 kurveblade. Er terrænet af ensartet ruhed, er ét kurveblad tilstrækkeligt.
- 3) På hvert af de udvalgte kurveblade aflæses form- og skala-faktorer for den højde, der svarer til møllens navhøjde.
- 4) Skemaet vist i eksempel 3.5, kapitel 3, udfyldes, de angivne beregninger udføres, hvorefter vindens sandsynlighedstæthedsfunktion haves.

Møllens middelenenergiproduktion kan nu bestemmes, hvis møllens effektkurve er kendt. Er effektkurven af en form, således at den tilnærmelsesvis er stykvis lineær mellem ind- og udkoblings-hastigheden, kan tabellerne i appendiks A umiddelbart anvendes.



Skitse af middelproduktionsbestemmelse

Fejlen på den ovenfor skitserede beregning af middelenergiproduktion skønnes at være mindre end 5%, hvis beregningerne gennemføres for et terræn, der ikke er alt for kompliceret.

2.3. Retningssektorernes energiindhold

Det er umiddelbart indlysende, at en vindmølle bør anbringes således, at vinden i så høj grad som muligt kan blæse frit mod møllen uden først at svækkes af lægivende elementer. Praktiske, lovmæssige og andre forhold gør dog ofte, at møllen må anbringes nær bebyggelse. Det er derfor vigtigt, at møllen placeres således i forhold til bebyggelse, at der under de givne forhold fås så stort et energiudbytte som muligt. I tabel 2.2 er angivet middelenergiindholdet i $\text{kWh/m}^2/\text{år}$ i vinden i 10 meters højde over et fladt landbrugsområde uden læhegn.

Tabel 2.2. Energiindhold i otte 45° vindretningssektorer beregnet for 10 meters højde - ruhedsklasse 1.

Retningssektor	Energiindhold kWh/m ² /år
N	53
NØ	90
Ø	185
SØ	261
S	177
SV	411
V	641
NV	177

Det fremgår af tabel 2.2, at en mølle almindeligvis bør placeres således, at der er så frit som muligt i SV og V sektorerne, og at møllen derfor bør placeres syd for en eventuel bebyggelse eller andre lægivende elementer.

2.4. Læ

Læ er defineret som den relative nedsættelse i vindhastigheden, der skyldes en eller anden genstand i terrænet. Læet i et bestemt punkt er da

$$S = \frac{V - V_1}{V} \quad (2.1)$$

hvor V er vindhastigheden i punktet, når læforanstaltningen ikke er tilstede og V_1 er vindhastigheden i punktet, når genstanden er tilstede. S angives ofte i procent.

Den nødvendige afstand fra en lægiver til en mølle afhænger af møllens navhøjde, og lægiverens højde og udstrækning på tværs af vinden. Ser vi på et hus, vil der bag dette og op til ca. to gange husets højde være et vindfelt, der er stærkt forstyrret af huset. Dette skyldes, at der bag huset dannes store hvirvler,

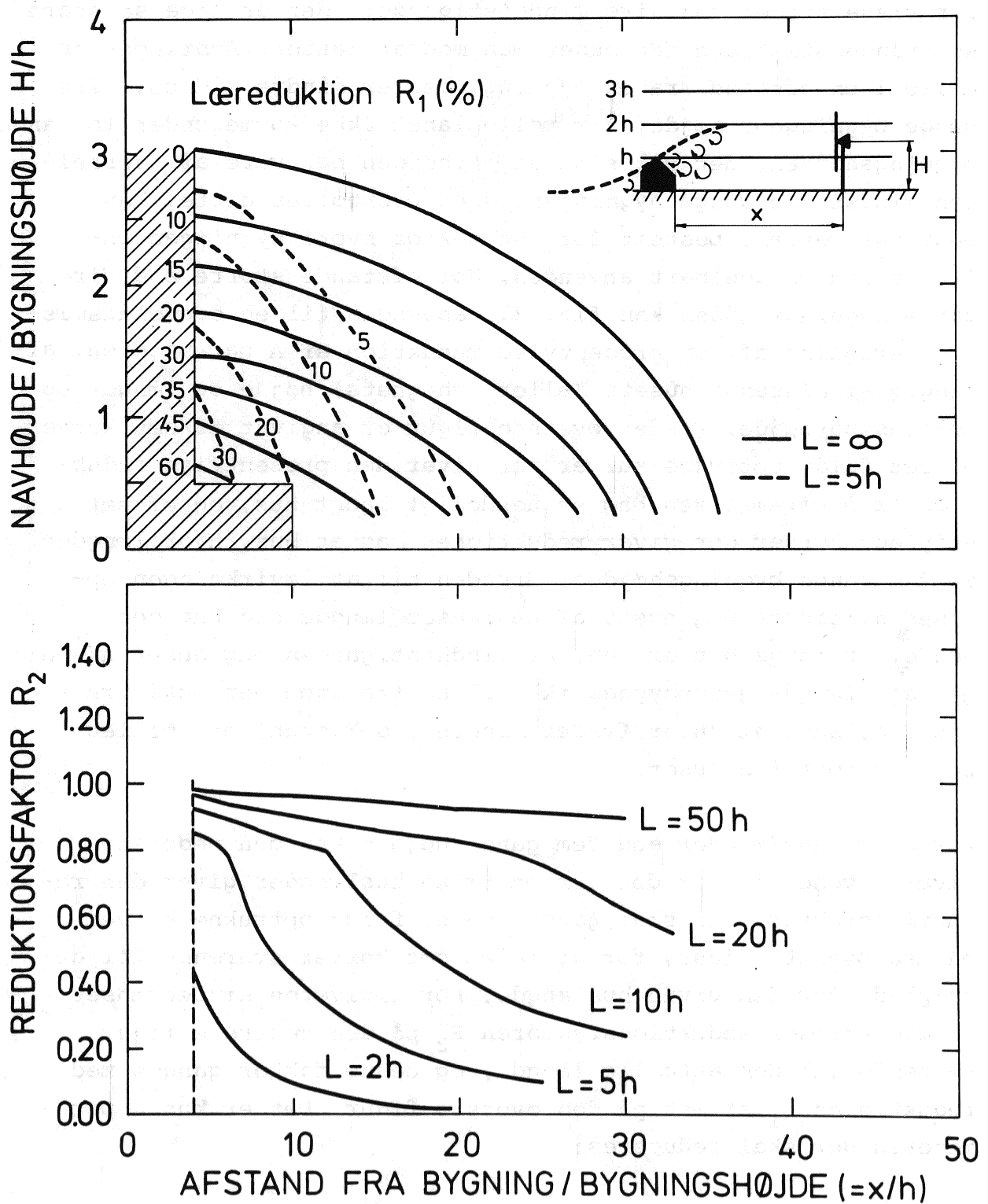


Fig. 2.1. Kurver til brug ved overslagsmæssig beregning af den procentvise reduktion af A parameteren bag en lægiver. Anvendelsen er forklaret i teksten.

der visse steder kan give vindhastigheder, der er lige så store som vindhastigheden før huset men modsat rettet. Anbringes en mølle i en afstand fra en bygning, der er mindre end ca. fire gange bygningens højde, bør mølleplanet ikke komme under to gange bygningshøjden, det vil sige at navhøjden bør være af størrelsen mindst tre gange bygningshøjden. Overholdes dette, kan A og C parametrene bestemt for den sektor hvori bygningen befinder sig umiddelbart anvendes. For afstande større end fire gange bygningshøjden kan fig. 2.1 anvendes til en overslagsmæssig beregning af den procentvise reduktion af A parameteren, afhængig af afstand, husets (eller læhegnets) højde og længde og møllens navhøjde. På den øverste figur er angivet to sæt kurver, et sæt fuldt optrukne kurver der giver den procentvise reduktion af A parameteren bag et uendeligt langt hus, og et sæt stiplede kurver der giver reduktionen bag et hus, hvor længden er fem gange bygningshøjden. Grunden til at lævirkningen opløses hurtigere bag huset af begrænset længde end bag det uendeligt lange hus er den, at vindhastigheden bag huset af begrænset længde genopbygges ikke alene fra oven men også fra siderne, samt at huset fylder mindre i sektoren, når møllen bevæges bort fra huset.

For andre huslængder end fem gange højden kan den nederste figur anvendes, idet den for en række huslængder giver den reduktionsfaktor, der skal ganges på de fuldt optrukne kurver på den øverste figur, for at få et sæt kurver svarende til de stiplede for den givne huslængde. For lægiveren af begrænset længde aflæses reduktionsfaktoren R_2 på den nederste figur svarende til den aktuelle længde, og denne faktor ganges med reduktionen R_1 aflæst på den øverste figur. Det er kun A parameteren der skal reduceres:

$$R = R_1 \times R_2$$

$$A_{\text{reduceret}} = A_{\text{aflæst}} \cdot (100 - R) / 100 \quad (2.2)$$

I eksempel 3.10 er vist en beregning med læeffekt, og virkningen af effekten er illustreret for station Skrydstrup i appendiks D.

2.5. Indflydelse af specielle ruhedsområder

Vi så i det foregående afsnit, hvorledes læt bag en lægiver opløses i en vis afstand bag lægiveren. I et område med mange lægivere, for eksempel en bebyggelse, vil læt bag den enkelte lægiver opløses, men området øver en samlet ruhedsmæssig indflydelse på vindhastigheden i en vis afstand fra området, afhængig af den højde over terræn der betragtes.

Det er således ved placeringsovervejelserne vigtigt at vide, hvilke områder i hver retningssektor, der udøver størst indflydelse på vindhastigheden i navhøjde. Ved en 50 meter høj mølle vil for eksempel buske og træer, der er 5 meter høje, i en afstand ud til nogle hundrede meter ikke påvirke vinden i navhøjde væsentligt, idet vinden i 50 meter ikke har nået at mærke ruhedsforandringen over en så kort afstand. Tilsvarende er det klart, at lægiveren meget langt fra møllen kun har ringe indvirkning. Disse kvalitative overvejelser kan gøres mere kvantitative ved at benytte fig. 2.2, som viser hvilke ruhedsområder omkring en mølle, der øver den største indflydelse på vindhastigheden i navhøjde.

Vi ser for eksempel, at for en mølle med navhøjde på 20 meter vil terrænforholdene i en afstand på 150 meter fra møllen give den maksimale indflydelse på vindhastigheden i navhøjde. Fig. 2.2 kan benyttes til det første overslagsmæssige valg af en mølleplacering. Vedrørende produktionsberegninger i det tilfælde hvor terrænuheden skifter i den enkelte sektor, henvises til afsnit 3.6.

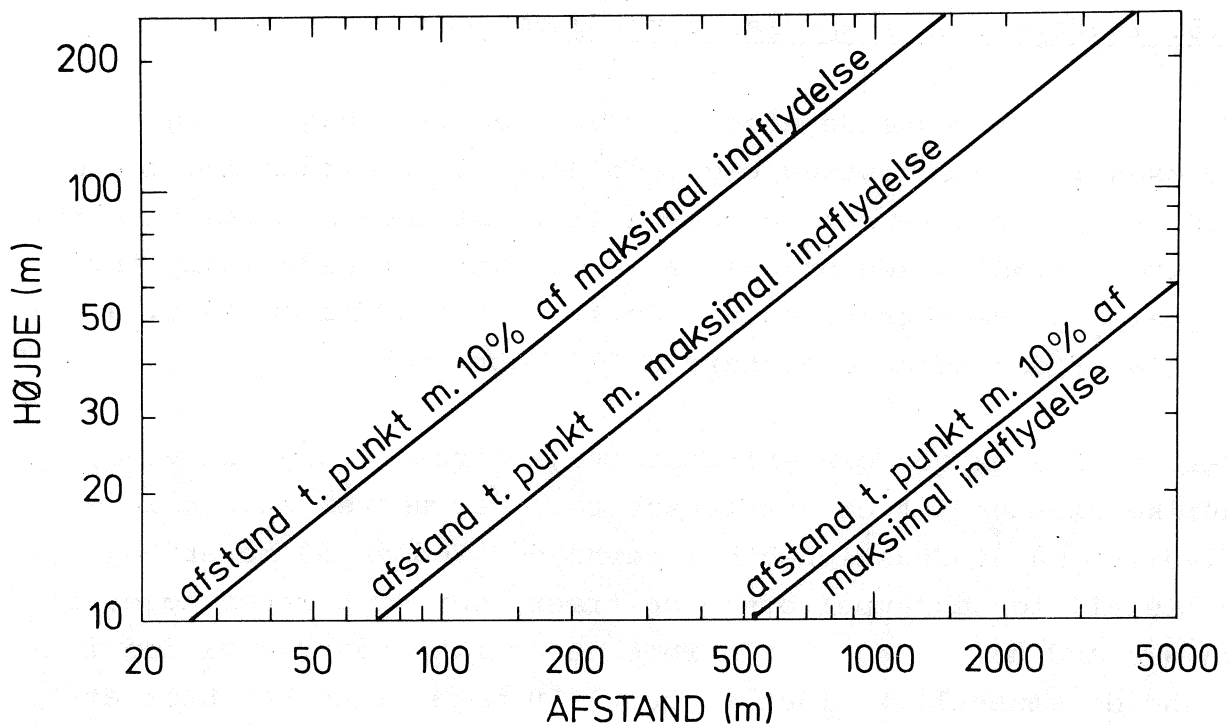


Fig. 2.2. Simple regel til bestemmelse af hvilke områder med tilhørende ruhed omkring en mølle der øver den største indflydelse på vindhastigheden i mølleplanet.

2.6. Topografi

Det er almindeligt kendt, at vinden på toppen af en bakke kan være stærkere end over et omliggende åbent fladt terræn. En mølle kan derfor ofte med fordel placeres på toppen af en bakke. Kalder vi forøgelsen i vindhastigheden for ΔS , har vi

$$\Delta S = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \quad (2.3)$$

hvor V_2 og V_1 er vindhastigheder i samme højde over terræn, henholdsvis direkte over forhøjningen og i den uforstyrrede strømning opvind fra denne. En tilnærmet værdi for ΔS kan findes ved:

$$\Delta S \approx 2 \frac{h}{L}, \quad L \gg h, \quad (2.4)$$

hvor h og L er henholdsvis bakkehøjden over terræn og en

karakteristisk længde af bakken, typisk defineret som vist på fig. 2.3. Bakkens udstrækning vinkelret på papirets plan skal være meget større end L , således at problemet kan betragtes som værende todimensionalt.

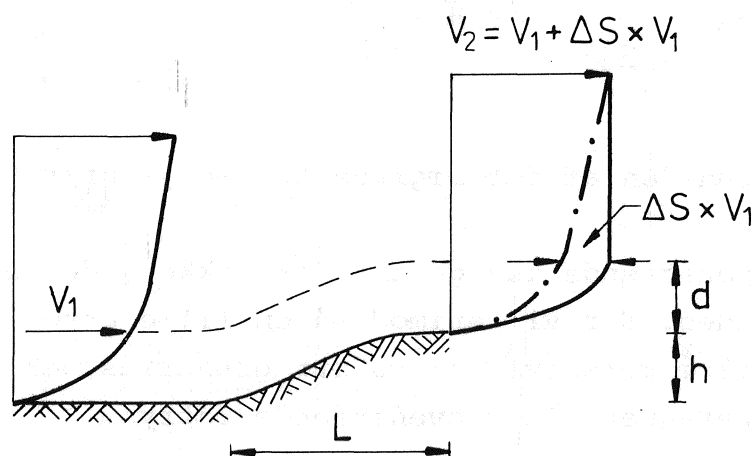


Fig. 2.3. Opvindshalvdelen af en todimensional bakke med principielle vindprofiler.

Over en vis højde d begynder ΔS gradvist at aftage mod nul. Med tilnærmelse er d givet ved $0.7 \times h_2$, hvor h_2 aflæses på fig. 3.7, idet der som afstanden ℓ benyttes den halve bakkebredde L .

Effekten af en bakkeplacering tages med i beregningerne ved at forøge A parameteren aflæst fra appendiks A for de sektorer, for hvilke vinden blæser mod bakken:

$$A_{\text{korrigeret}} = A_{\text{aflæst}} \times (1 + \Delta S) \quad (2.5)$$

Er navhøjden H ikke lig med d findes ΔS for højden H som følger:

$$\Delta S_H = \Delta S_d \frac{\ln\left(\frac{H}{z_o}\right)}{\ln\left(\frac{d}{z_o}\right)} \quad \text{for } H < d ,$$

(2.6)

$$\Delta S_H = \Delta S_d \frac{\ln\left(\frac{H}{L}\right)}{\ln\left(\frac{d}{L}\right)} \quad \text{for } H > d ,$$

hvor z_o er ruheden af det omgivne terræn jævnfør tabel 2.1.

Bemærk at ovenstående kun gælder for bakker, der er lange på tværs af vinden. Ser vi derimod på en lille enkeltstående bakke med tilnærmelsesvis cirkulært grundrids, er ΔS ca. 20% mindre end beregnet efter ovenstående udtryk.

Yderligere gælder formlerne kun for bløde bakker og ikke for klinger og skrænter, hvor den kraftige deformation af luftstrømmen blandt andet kan give lokal lævirkning. Denne virkning kan strække sig mange gange klintens højde ind i landet, men er til gengæld begrænset til de nederste 5 og 10 meter over jordens overflade for de klinthøjder, der forekommer i Danmark, og er således kun af begrænset betydning for placeringen af større vindmøller. I en vis højde over klintens lævirkningszone vil der forekomme en hastighedsforøgelseeffekt som ved bakker.

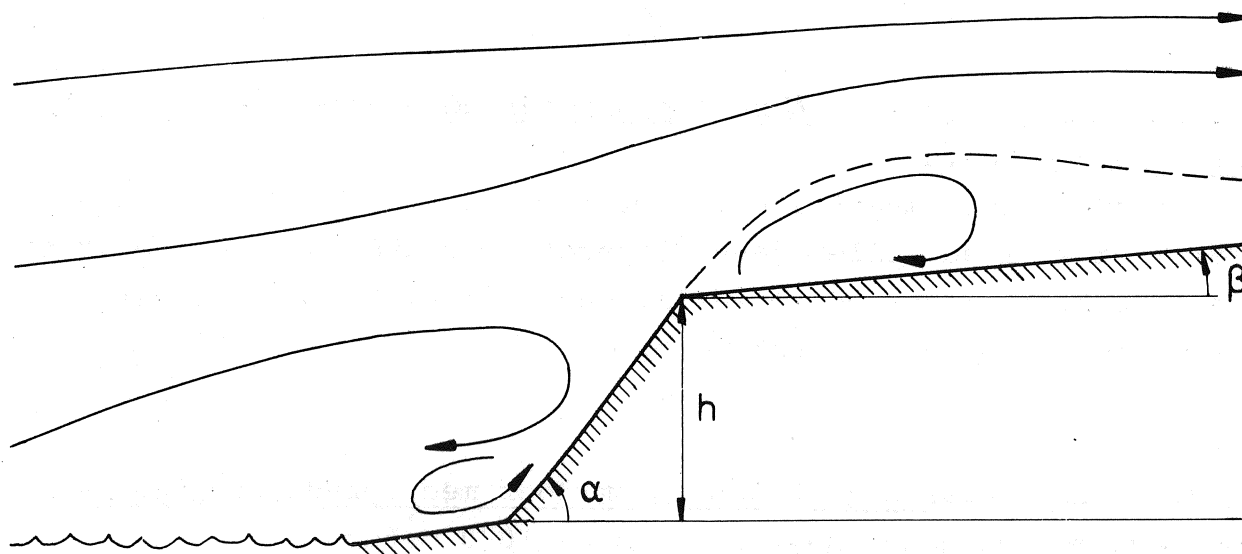


Fig. 2.4. Lævirkningszone ved klint. Problemet afhænger af vinklerne α og β samt højden h .

2.7. Ruhedsklassificering af et terræn

Efter vi i de foregående afsnit har gennemgået en række af de komplikationer, der ofte opstår i forbindelse med udvælgelsen af en mølleplacering, skal vi nu gennemgå det fundamentale grundlag for produktionsberegningen nemlig ruhedsklassificeringen af det omgivne terræn.

Ruhedsklassificeringen går i korthed ud på at inddele det foreliggende terræn i de fire terræntyper, der er angivet i tabel 2.1. Når dette er gjort, og sammen med eventuelle komplikationer indtegnet på et kort (målebordsblad) kan placeringen vælges og produktionen beregnes. En kortfattet karakteristik er i det følgende givet af hver terræntype.

2.7.1. Ruhedsklasse 0. Vandområder

Have, fjorde og søer.

2.7.2. Ruhedsklasse 1. Åbne landområder uden væsentlig beplantning og bebyggelse

Områderne virker meget åbne, især fordi der er meget få hegn. Terrænet er fladt eller jævnt kuperet. Der kan forekomme enkelte lave småplantninger og spredtliggende gårde. Fig. 2.5 viser eksempler på denne ruhedsklasse.

2.7.3. Ruhedsklasse 2. Landbrugsområder med spredt bebyggelse og hegn med en gennemsnitsafstand på 1000 meter

Områderne er karakteriseret ved, at der mellem de mange levende hegn er åbne arealer, der giver landskabet et åbent præg. Terrænet dækker fra fladt til kraftigt kuperet. Der forekommer en del beplantning, og spredt bebyggelse er almindeligt. Fig. 2.6 viser eksempler på denne ruhedsklasse.

2.7.4. Ruhedsklasse 3. Samlede bebyggelser, skove og landbrugsområder med mange hegn

Landbrugsområderne er karakteristiske ved de mange læhegn, der giver landskabet en lukket karakter. Afstanden mellem læhegnene er af størrelsen et par hundrede meter. Skove og større områder med samlet bebyggelse hører også til i denne klasse. Fig. 2.7 viser et eksempel på denne ruhedsklasse.

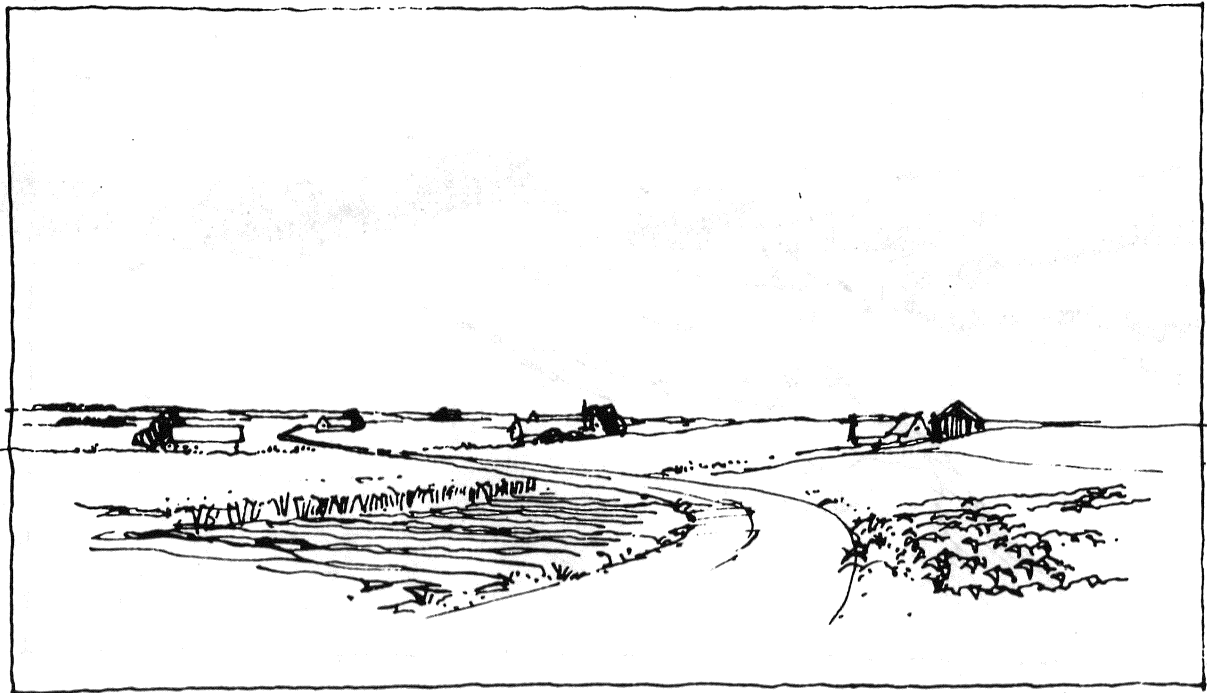
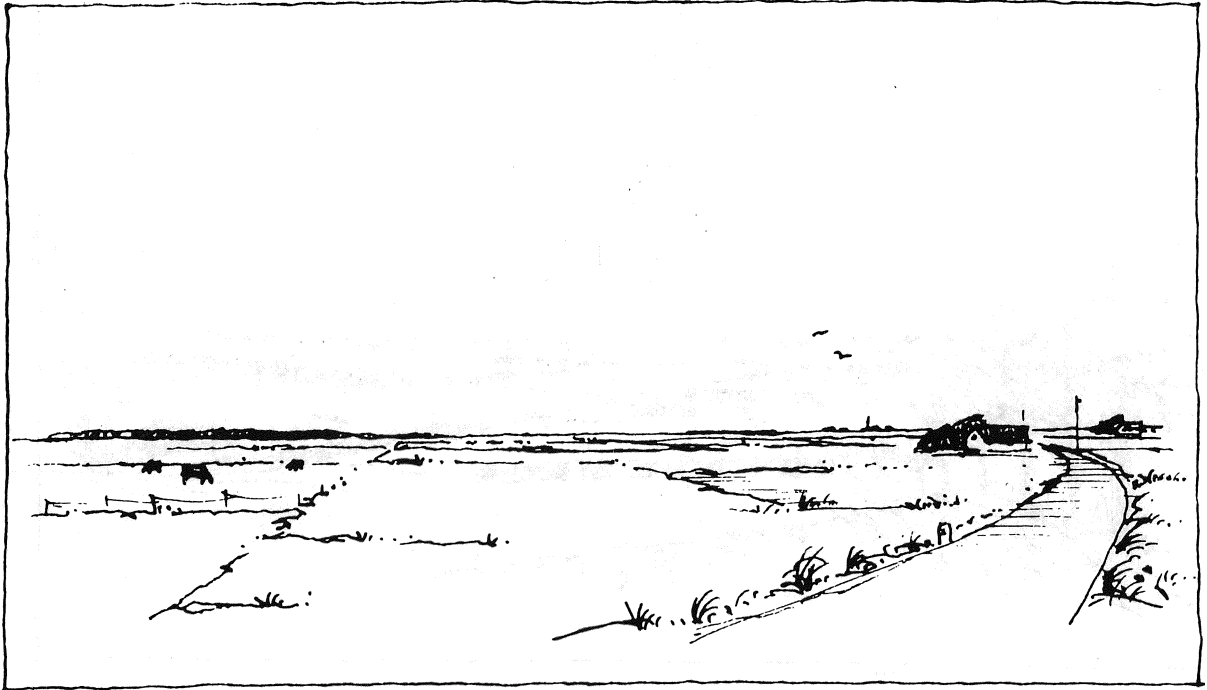


Fig. 2.5. Eksempler på terræntyper tilhørende ruhedsklasse 1.

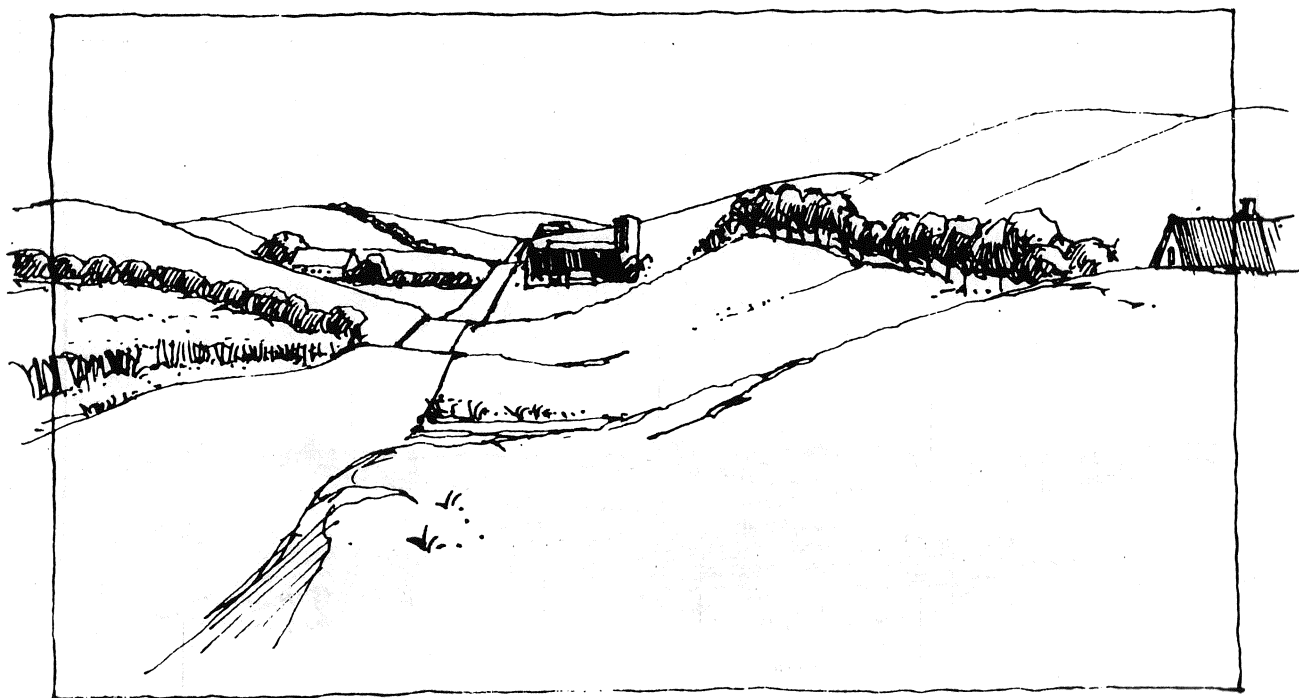
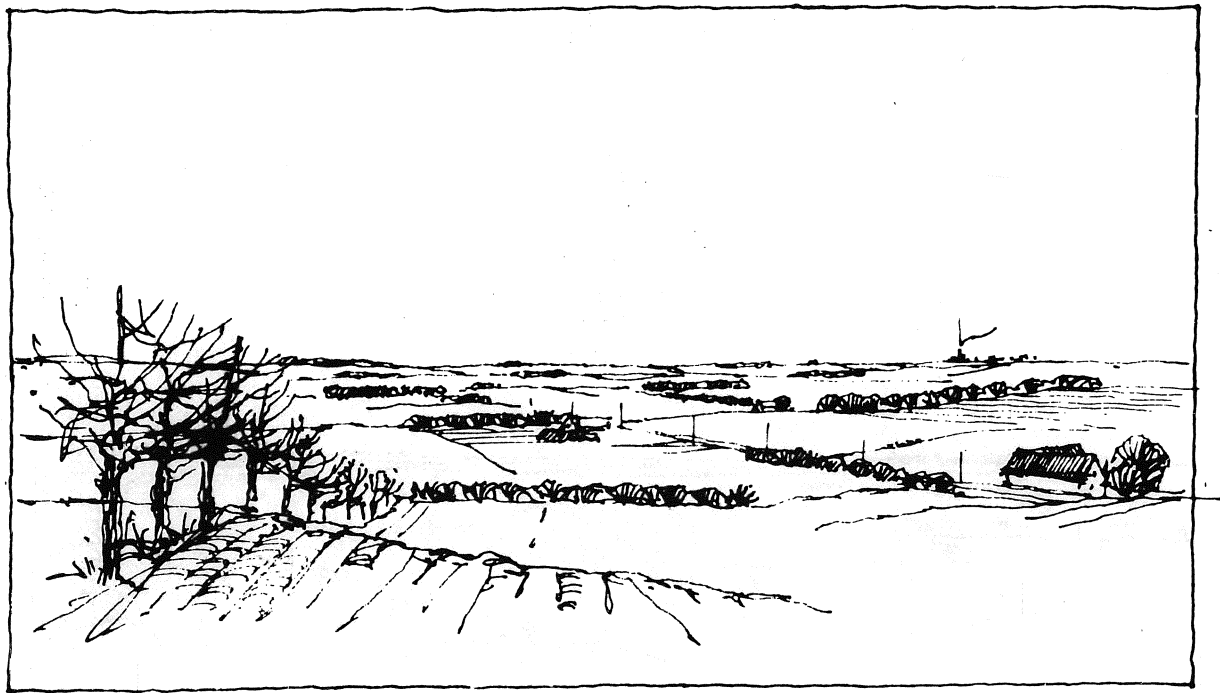


Fig. 2.6. Eksempler på terræntyper tilhørende ruhedsklasse 2.

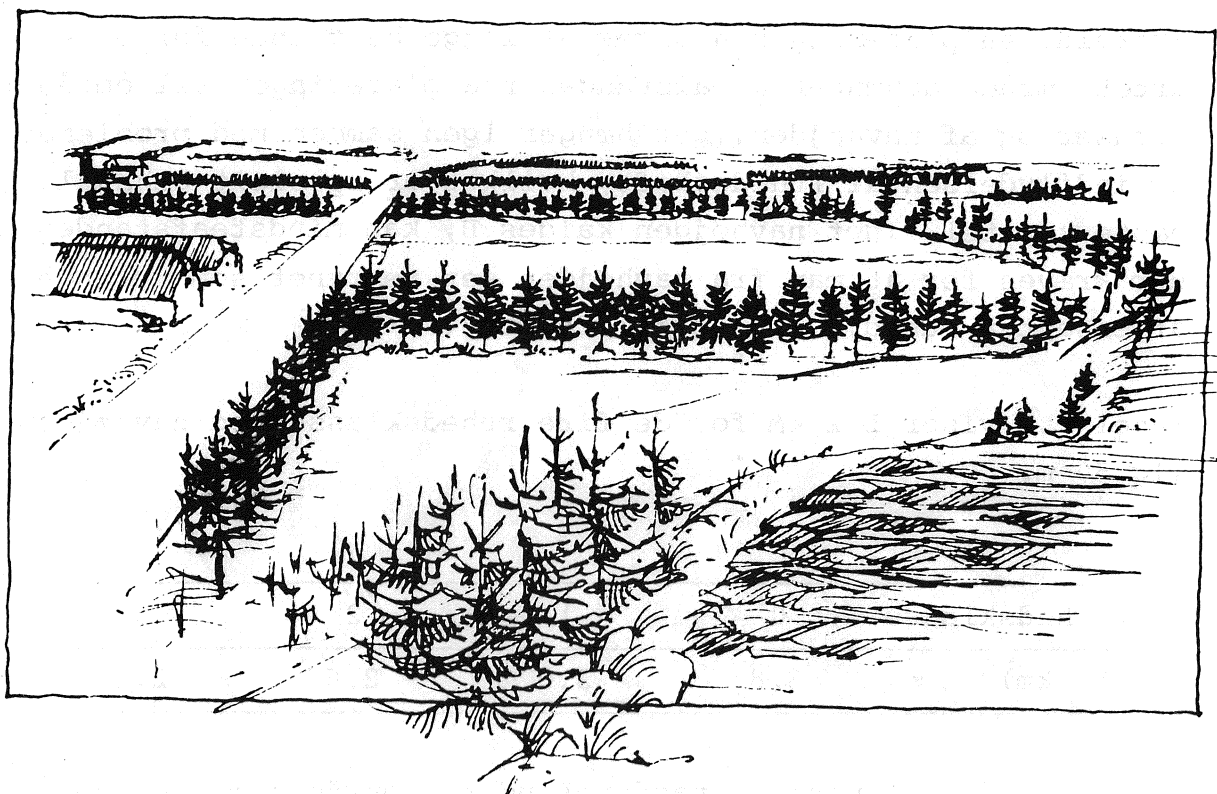


Fig. 2.7. Eksempel på terræntype tilhørende ruhedsklasse 3.

2.8. Ruhedsbestemmelse af terrænet omkring en mølle

Vi er nu nået til det punkt, hvor vi, i det mindste i princippet, står med et målebordsblad over det område, inden for hvilket møllen kan placeres. På kortet er afmærket områder af forskellig ruhedsklasse samt forekommende lægivende elementer. Vi vælger nu, ud fra principperne beskrevet i dette kapitel, et antal gode placeringer og indtegner en sektorinddeling ved hver placering. For placeringer, der ligger inden for et område af en vis udstrækning og med en ensartet terræntype, er det tilstrækkeligt at bestemme én terræntype og dermed én ruhedslængde. De videre beregninger udføres derefter som beskrevet i næste kapitel, idet det kun er nødvendigt at anvende ét af kurvebladene i appendiks A til bestemmelse af A og C parametrene for de udvalgte placeringer.

Hvorvidt en placering kan siges at ligge helt indenfor et ensartet område afhænger af afstanden fra placeringen til områdets grænser og af navhøjden. Det hænger igen sammen med problemet om indflydelsen af ruhedsskift, hvilket er specielt behandlet i næste kapitel. Idet navhøjden kaldes H , kan mindsteafstanden L , der kræves for at man fra navhøjden ser terrænet som værende af ensartet ruhed, aflæses af fig. 3.7.

Tabel 2.3 viser L i km for de fire ruhedsklasser og navhøjden lig 50 m.

Ruhedsklasse	0	1	2	3
L (km)	3.8	3.0	2.6	2.1

Tabel 2.3. Mindsteafstanden L ud til områdegrensen, der kræves for at et område, set fra højden 50 m, kan regnes som værende af ensartet ruhed.

Vi ser, at der optræder to typer af komplikationer, når ruheden af terrænet omkring en mølle skal bestemmes:

- 1) Ruhedsklassen skifter fra den ene retningssektor til den anden. Et eksempel på en produktionsberegning for dette tilfælde er vist i eksempel 3.6, og en ruhedsbestemmelse er vist i appendiks D for station Tirstrup.
- 2) Ruhedsklassen skifter i den enkelte sektor. Eksempler herpå for henholdsvis bestemmelse af A og C parametrene og ruhedsbestemmelse er vist i eksempel 3.9 og i appendiks D for station Rønne.

Vi skal understrege, at grunden til, at vi arbejder med otte sektorer og ikke tre eller fire, ikke skyldes et behov for at få terrænets ruhed nøje specificeret i 8 sektorer, men derimod ønsket om fleksibilitet til i særlige tilfælde at kunne fastlægge og tage i regning markante terrænskift såsom kyster og skovbryn. Den samme bemærkning gælder beregningsproceduren for terrænskift i den enkelte sektor. Helt generelt gælder det, at man ikke bør fokusere for stærkt på de mange komplikationer, der ofte synes at opstå, når terrænet omkring en mølle skal ruhedsbestemmes. I stedet bør produktionsberegningerne, som beskrevet i næste kapitel, gennemføres for forskellige valg af ruhedsklasse og ruhedsskift for de sektorer, hvori komplikationerne forekommer.

3. BEREGNING AF MIDDELENERGIPRODUKTION

3.1. Weibull parameter kurveblade

Terrænets ruhed bestemmes for hver af de otte (45°) retningssektorer centreret om retningerne N, NØ, Ø, SØ, S, SV, V, NV, som beskrevet i kapitel 2. For hver sektor er hermed fastlagt en ruhedsklasse (0-3).

Weibull parametrene A og C svarende til den valgte ruhedsklasse aflæses for hver sektor på kurvebladene i appendix A. På disse kurveblade er øverst angivet, hvilken sektor der refereres til, den hyppighed hvormed vinden optræder i den pågældende sektor samt ruhedsklasse. Weibull parametrene A og C aflæses henholdsvis på den nederste og øverste vandrette skala ud for den valgte højde over terræn (lodrette skala). For hver ruhedsklasse er der foruden kurveblade svarende til de otte separate retningssektorer medtaget et kurveblad, som viser Weibull parametrenes højdevariation for samtlige retninger i det specielle tilfælde at terrænet er homogent, dvs. alle sektorer har samme ruhed.

3.2. Bestemmelse af sandsynligheden for en given vindhastighed

Som beskrevet i appendiks C giver Weibull fordelingen et mål for sandsynligheden for en given vindhastighed. Som det simpleste tilfælde kan vi se på sandsynligheden for en vindhastighed V i højden z over et homogent terræn af en given ruhedsklasse. Weibull parametrene kan i dette tilfælde findes direkte ved hjælp af kurvebladet for det homogene tilfælde svarende til den valgte ruhedsklasse. Aflæses her parametrene A og C har vi sandsynligheden for en vindhastighed mellem V og $V + \Delta V$ givet ved

$$\text{Pr}(V, V + \Delta V) = \exp\left(-\left(\frac{V}{A}\right)^C\right) - \exp\left(-\left(\frac{V + \Delta V}{A}\right)^C\right) \quad (3.1)$$

Eksempel 3.1

Vi ønsker hyppigheden af vindhastigheder mellem 15 og 20 ms^{-1} i et homogent område med ruhedsklasse 2 (ruhed 5 cm). Vindhastigheden ønskes vurderet i højden 40 m over terræn. På kurvebladet svarende til ruhedsklasse 2 og sektor "alle" aflæser vi udfor 40 på den lodrette akse $A = 7 \text{ ms}^{-1}$ og $C = 1.93$. Indsætter vi i udtrykket ovenfor får vi

$$\text{Pr}(15, 20) = .012$$

dvs. i 1.2% af tiden må vi forvente vindhastigheder i dette interval.

Ønsker vi hyppigheden af vinde indenfor et givet hastighedsinterval og fra en given retningssektor, må vi benytte kurvebladet svarende til en pågældende sektor. Hyppigheden fås så ved at multiplicere hyppigheden som beregnet ovenfor med hyppighed for vinde i sektoren som angivet på kurvebladet.

Eksempel 3.2

Tænker vi os som i eksemplet ovenfor, at vi ønsker en vurdering af hyppigheden af vindhastigheder mellem 15 og 20 ms^{-1} i 40 m

over et terræn af ruhedsklasse 2, men nu med den yderligere betingelse, at retningen skal være i østsektoren, får vi ved aflæsning på kurvebladet:

$$A = 6.6; \quad C = 2.29 \quad \text{og} \quad f_{\emptyset} = 12.7\%$$

dette giver

$$\begin{aligned} \text{Pr}(15, 20, \emptyset \text{st}) &= 0.127 \cdot \left(\exp\left(-\left(\frac{15}{6.6}\right)^{2.29}\right) - \exp\left(-\left(\frac{20}{6.6}\right)^{2.29}\right) \right) \\ &= 1.8 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

Multipliserer vi f.eks. dette tal med antal timer på 10 år (= 87660) får vi

$$1.8 \cdot 10^{-4} \cdot 87660 \text{ timer} = 16 \text{ timer.}$$

Vi må altså forvente i middel 16 timer med østenvinde i det nævnte hastighedsinterval i 40 timers højde over homogent terræn af ruhedsklasse 2 over en 10 års periode. Almindeligvis er vi ikke specielt interesserede i hyppigheden af en given vindhastighed i en given retningssektor, men kun interesserede i hyppigheden uafhængigt af retningen. Dette gælder specielt for vurdering af vindkraftproduktion. Som vi har set kan Weibull parametrene svarende til vindfordelingen for vinde fra alle retninger over homogent terræn direkte aflæses af kurvebladene. I almindelighed må vi tage i betragtning, at terrænets ruhed ikke er den samme i alle retninger, specielt kan man tænke på en position ved en kystlinie, hvor havsektorerne skal tilskrives ruhedsklasse 0, og landsektorerne skal tilskrives en ruhedsklasse 1-3 afhængig af terrænets beskaffenhed som beskrevet i kapitel 2. I disse tilfælde kan vi som ovenfor beregne hyppigheden i hver enkelt sektor; den totale hyppighed er så givet som summen af hyppighederne for de enkelte sektorer.

Eksempel 3.3

Vi tænker os, at vi som i eksemplerne ovenfor er interesserede i hyppigheden af vinde mellem 15 og 20 ms^{-1} i 40 meters højde over terræn, men denne gang i et terræn, hvor terrænet i sektorerne N, NØ, Ø, SØ og S har ruhedsklasse 2, medens de resterende sektorer har ruhedsklasse 0, dvs. vi tænker på en vestvendt kyst.

Ved aflæsning på de relevante kurveblade får vi, idet vi for hver sektor beregner (som i eksemplet ovenfor) $\text{Pr}(15,20)$ og multiplicerer med hyppigheden for vinden i sektoren:

Sektor/ Ruheds- klasse	Weibull param.		Hyppigh.	f·Pr
	A	C	f	
N 2	5.5	1.86	0.066	0.00010
NØ 2	5.9	1.95	0.092	0.00019
Ø 2	6.6	2.29	0.127	0.00018
SØ 2	6.8	2.07	0.122	0.00070
S 2	7.6	2.00	0.157	0.00304
SV 0	10.2	2.08	0.172	0.01551
V 0	10.4	2.03	0.198	0.01961
NV 0	7.7	1.72	0.089	0.00331
			1.023	0.0426

$$\text{hvoraf } \text{Pr} = \frac{4.26}{1.02} = 4.2\%$$

Dvs. i 4.2% af tiden må vi forvente vindhastigheder mellem 15 og 20 ms^{-1} i dette tilfælde (sammenlign med resultaterne fra

eksemplerne ovenfor). Bemærk at i dette tilfælde med inhomogent terræn er summen af hyppighederne for vinde fra de enkelte retningssektorer ikke nøjagtig 100%. Dette skyldes, at vinklen mellem den geostrofiske vind og overfladevinden afhænger af terrænets ruhed (se fig. C4 i appendiks C). Afvigelsen er dog i praksis meget lille og kan eventuelt negligeres, selvom man principielt bør tage hensyn til den som vist i eksemplet.

3.3. Bestemmelse af totale middeleffekt

I forbindelse med vindkraft er vi ikke specielt interesseret i hyppigheden af vinde i et givet hastighedsinterval eller retningsinterval, men derimod i hvilken vindkraftproduktion vi kan forvente fra en vindmølle anbragt i et givet terræn. Til en sådan beregning er det nødvendigt foruden vindstatistikken at kende vindmøllens produktions karakteristisk, dvs. hvorledes møllens afgivne effekt afhænger af vindhastigheden. Dette vil blive betragtet i nærmere detalje nedenfor. Til en første sammenligning mellem forskellige mulige placeringer af en mølle vil det være af interesse at vurdere den totale effekt, der er indeholdt i vinden for forskellige valg af navhøjder og ruheder for det omgivende terræn. Denne effekt er som vist i appendiks C givet ved

$$E = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (3.2)$$

hvor E er den mængde bevægelsesenergi, der i middel pr. tidsenhed strømmer igennem en flade på 1 m^2 . Luftens massefylde er ρ og V^3 er middelværdien af tredje potens af vindhastigheden. Ved hjælp af Weibull parametrene kan denne størrelse beregnes som

$$E = A^3 \cdot F_E(C) \quad (\text{kWh/m}^2/\text{år}) \quad (3.3)$$

hvor $F_E(C)$ er tabellagt i tabel A1. Denne størrelse kan beregnes for hver retningssektor og den totale energimængde er så givet ved den vægtede sum:

$$E = f_N \cdot E_N + f_{N\emptyset} \cdot E_{N\emptyset} + \dots + f_{NV} \cdot E_{NV} \quad (3.4)$$

hvor f_N , $f_{N\emptyset}$ osv. er hyppighederne svarende til de enkelte sektorer (øverst på kurvebladene) og E_N , $E_{N\emptyset}$ etc. er energiindholdet beregnet efter ovenstående udtryk for hver sektor.

Eksempel 3.4

Vi betragter igen situationen fra forrige eksempel, og ønsker at beregne det totale effektindhold i vinden i 40 meters højde. Vi får følgende skema:

Sektor/ Ruheds- klasse	Weibull param.		Hyppigh.	E	f · E
	A	C	f		
N 2	5.5	1.86	0.066	1295	85
NØ 2	5.9	1.95	0.092	1513	139
Ø 2	6.6	2.29	0.127	1819	231
SØ 2	6.8	2.07	0.122	2176	265
S 2	7.6	2.00	0.157	3146	494
SV 0	10.2	2.08	0.172	7309	1257
V 0	10.4	2.03	0.198	7938	1572
NV 0	7.7	1.72	0.089	3940	351
			1.023		4394

hvoraf $E = \frac{4394}{1.02} = 4295 \text{ (kWh/m}^2\text{/år)}$

Det må bemærkes, at ingen vindmølle kan producere denne effekt pr. m^2 rotorareal; i praksis vil ca. 25-40% kunne udnyttes.

(Simple aerodynamiske betragtninger giver en teoretisk øvre grænse for effektiviteten på 59%).

3.4. Bestemmelse af Weibull fordelingen ved skiftende ruhed

I mange tilfælde vil vi være interesserede i Weibull fordelingen svarende til alle vindretninger. Som vi har set, er det muligt at aflæse parametrene til denne fordeling direkte af kurvebladene i det specielle tilfælde, at terrænet er homogent. I det generelle tilfælde, hvor der ikke er samme ruhed i alle sektorer, kan vi med god tilnærmelse beregne Weibull fordelingsparametre idet (appendiks C):

$$M = A \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{C}\right) \quad (3.5)$$

$$V^2 = A^2 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{2}{C}\right),$$

hvor M er middelværdien og V^2 er middelkvadratet i en Weibull fordeling med parametre A og C . Γ er gammafunktionen. For hver retningssektor kan vi ved hjælp af disse udtryk bestemme M og V^2 . De tilsvarende værdier i den totale fordeling er så givet som

$$M = f_N \cdot M_N + f_{N\emptyset} \cdot M_{N\emptyset} + \dots + f_{NV} \cdot M_{NV} \quad (3.6)$$

$$V^2 = f_N \cdot V_N^2 + f_{N\emptyset} \cdot V_{N\emptyset}^2 + \dots + f_{NV} \cdot V_{NV}^2$$

Weibull parametrene svarende til den totale fordeling kan nu estimeres ved brug af udtrykkene:

$$\frac{M^2}{V^2} = \frac{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{C}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{2}{C}\right)} \quad \text{og} \quad M = A \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{C}\right) \quad (3.7)$$

hvor A og C nu betegner parametrene svarende til den totale fordeling.

Disse ligninger er såkaldte transcendent ligninger, og de kan kun løses ved brug af numeriske metoder. Til den praktiske anvendelse har vi derfor tabellagt løsningerne i tabellerne A4 og A5; ligeledes har vi i tabellerne A2 og A3 tabellagt gammafunktionen i det område, vi har brug for. Fremgangsmåden er følgende:

- 1) Bestem A og C samt f for hver sektor.
- 2) Bestem $F_M(C)$ ved opslag i tabel A2 for hver sektor, multipliceret med A for sektoren gives så $M_N, M_{NØ}, \dots, M_{NV}$.
- 3) Tilsvarende bestemmes V^2 for hver sektor ved hjælp af $F_V(C)$ (tabel A3) og $V^2 = A^2 \cdot F_V(C)$.
- 4) Den vægtede sum af middelværdierne og middelkvadraterne dannes, dette giver middelværdien M og middelkvadratet V^2 for totalfordelingen af vindhastigheden.
- 5) M^2/V^2 udregnes og denne værdi bruges som indgangsværdi i tabel A4, der giver C for den totale fordeling.
- 6) A for den totale fordeling beregnes som $A = M \cdot F_A(C)$, hvor C under pkt. 5 bruges i tabel A5 og M er beregnet under pkt. 4.

Denne beregning foretages lettest ved benyttelse af et skema som vist i følgende eksempler.

Eksempel 3.5

Vi tænker os en situation som i de to foregående eksempler og har så følgende skema:

SEKTOR/ RUHEDS- klasse	A	C	f	M	V ²	fM	fV ²
N 2	5.5	1.86	0.066	4.88	31.3	0.322	2.07
NØ 2	5.9	1.95	0.092	5.23	35.2	0.481	3.24
Ø 2	6.6	2.29	0.127	5.85	41.5	0.743	5.27
SØ 2	6.8	2.07	0.122	6.02	45.6	0.734	5.56
S 2	7.6	2.00	0.157	6.73	57.8	1.057	9.07
SV 0	10.2	2.08	0.172	9.04	102.4	1.555	17.61
V 0	10.4	2.03	0.198	9.21	107.5	1.824	21.29
NV 0	7.7	1.72	0.089	6.87	64.0	0.611	5.70
			1.02			7.327	69.81
			Division			7.18	68.4
					$\frac{M^2}{V^2} =$	0.754	

$$M = \frac{7.33}{1.02} = 7.18$$

$$\frac{M^2}{V^2} = 0.754 \Rightarrow$$

$$V^2 = \frac{69.81}{1.02} = 68.4$$

$$C = F_C(0.754) = 1.81 \quad (\text{tabel A4})$$

$$A = F_A(1.81) \cdot 7.18 = 8.1 \text{ ms}^{-1} \quad (\text{tabel A5})$$

Benytter vi nu tabel A1 til at estimere det totale energiindhold pr. m² får vi

$$E = (8.1)^3 \cdot F_E(1.81) = 4280 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$$

dette tal kan sammenlignes med tallet fra forrige eksempel (4295 kWh/m²/år). Afvigelsen er mindre end 1% og kan forklares ved afrundingsfejl.

Det må bemærkes, at metoden forudsætter, at totalfordelingen er meget nær en Weibull fordeling, og den kan kun anvendes i sådanne tilfælde. Det fremgår af appendiks D, at vindhastigheder med god tilnærmelse er Weibull fordelte, hvilket også er en almindelig erfaring. Metoden er derfor tilstrækkelig nøjagtig.

Eksempel 3.6

Som eksempel på en beregning af A og C parametrene, når det er nødvendigt at tage hensyn til lægiverer som beskrevet i afsnit 2.4, har vi valgt forholdene gældende for vindmåleren på station Skrydstrup, således at vi kan sammenligne resultatet med målingerne.

Vindmåleren er anbragt i højden 9 meter, og terrænet er således, at ruhedsklassen er 1 i alle sektorer. I hver af sektorerne Ø, SØ, S og SV er der bygninger og læhegn, der dækker hele sektoren.

Sektor	Afstand X	Højde af lægiver h	Længde L
Ø	200 m	10 m	∞
SØ	200 m	10 m	∞
S	100 m	5 m	∞
SV	200 m	10 m	∞

Ved hjælp af fig. 2 aflæses for navhøjde H lig med 9 m følgende reduktionsfaktorer R_1

Sektor	X/h	H/h	R_1
Ø	20	0.9	22%
SØ	20	0.9	22%
S	20	1.8	10%
SV	20	0.9	22%

Den totale Weibull fordeling svarende til denne situation beregner vi ved hjælp af skemaet fra eksempel 3.5, med A parameteren reduceret efter lign. (2.2) med ovenstående værdier for R_1 , og med R_2 lig med en.

SEKTOR Ruh.kl	A	C	f	M	V^2	fM	fV^2
N 1	4.7	1.70	0.065	4.19	24.0	0.272	1.56
NØ 1	4.8	1.71	0.090	4.28	25.0	0.385	2.25
Ø 1*	4.3	1.98	0.125	3.81	18.6	0.476	2.33
SØ 1*	4.6	1.92	0.122	4.08	21.5	0.498	2.62
S 1*	6.0	1.82	0.153	5.33	37.7	0.815	5.77
SV 1*	5.4	1.92	0.177	4.73	29.7	0.837	5.26
V 1	7.0	1.90	0.188	6.21	50.1	1.167	9.42
NV 1	5.0	1.57	0.080	4.49	28.7	0.359	2.30
*læreduktion			1.000			4.81	31.5
						4.81	31.5
						$\frac{M^2}{V^2} = 0.734$	

$$C = 1.71$$

$$A = 5.4$$

I appendiks D er vist den målte fordeling sammen med den Weibull fordeling, vi får ved henholdsvis at foretage beregningerne med og uden korrektion for læeffekten. Det fremgår af figuren, at den korrigerede fordeling viser den bedste overensstemmelse med den målte fordeling.

3.5. Bestemmelse af en vindmølles middeleffekt

Metoden, beskrevet i foregående afsnit, gør det muligt at estimere Weibull parametrene for en given højde over et terræn, hvor ruheden varierer med retningen, og vi kan som vist i de første eksempler i dette kapitel estimere sandsynligheden for vindhastigheder i et givet interval ved hjælp af disse parametre. Som nævnt tidligere giver beregningen af det totale effektindhold i vinden ikke direkte et mål for, hvor meget effekt en given vindmølle vil producere i middel, idet dette udbytte afhænger både af hyppigheden af en given vindhastighed og møllens energiproduktion ved denne vindhastighed. Kender vi møllens effektkarakteristik, det vil sige, hvorledes den afgivne effekt afhænger af vindhastigheden, kan vi beregne middeleffekten som: (læsere, der ikke er specielt interesserede i den matematiske udledning, kan springe det følgende over til fig. 3.2)

$$P = \int_0^{\infty} \text{Pr}(V) P(V) dV \quad (3.8)$$

hvor $\text{Pr}(V)$ er vindens sandsynlighedsfordeling, og $P(V)$ er effektkarakteristikken. Vi bestemmer Weibull parametrene for møllens navhøjde for det terræn, hvor møllen tænkes anbragt som beskrevet ovenfor og kan så beregne den forventede middeleffekt:

$$P = \int_0^{\infty} \left(\frac{C}{A}\right) \left(\frac{V}{A}\right)^{C-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{A}\right)^C\right) P(V) dV \quad (3.9)$$

I almindelighed kan dette integral ikke udtrykkes eksplicit og må udføres numerisk.

Vi antager nu, at møllens effektkarakteristik kan approximeres med en stykvis lineær funktion:

$$P(V) = \frac{P_{i+1} - P_i}{V_{i+1} - V_i} (V - V_i) + P_i \quad \text{for } V_i \leq V < V_{i+1} \quad (3.10)$$

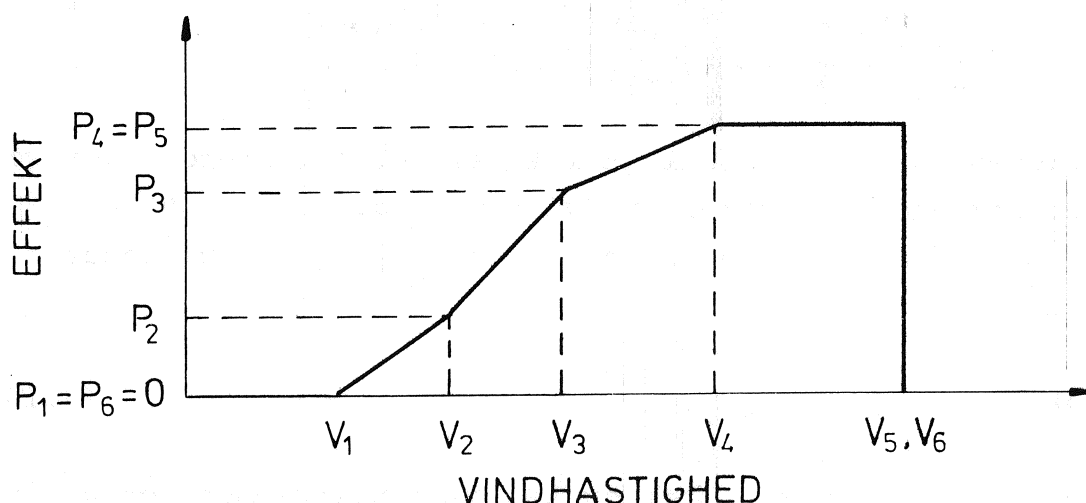


Fig. 3.1. Stykvis lineær effektkarakteristik.

I dette tilfælde kan integralet udføres som

$$P = \int_0^{\infty} \exp(-x) P(V) dx \quad \text{med} \quad x = \left(\frac{V}{A}\right)^C \quad (3.11)$$

Ved hjælp af delt integration kan vi omforme integralet:

$$P = \left[-P(V) \exp(-x) \right]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} \frac{dP(V)}{dV} \cdot \frac{dV}{dx} \cdot \exp(-x) dx, \quad (3.12)$$

første led er nul, og på hvert lineært stykke af $P(V)$ er $\frac{dP}{dV}$ konstant. Indfører vi $\alpha_i = \frac{V_i}{A}$ og indsætter $P(V)$ i integralet fås summen

$$P = \sum_i \frac{P_{i+1} - P_i}{\alpha_{i+1} - \alpha_i} \cdot \frac{1}{C} \cdot \int_{\alpha_i^C}^{\alpha_{i+1}^C} x^{\frac{1}{C} - 1} \exp(-x) dx \quad (3.13)$$

eller

$$P = \sum_i \frac{P_{i+1} - P_i}{\alpha_{i+1} - \alpha_i} \cdot \left[\frac{1}{C} \gamma\left(\frac{1}{C}, \alpha_{i+1}^C\right) - \frac{1}{C} \gamma\left(\frac{1}{C}, \alpha_i^C\right) \right], \quad (3.14)$$

hvor γ er den ufuldstændige gammafunktion. Vi kalder funktionen $\frac{1}{C} \gamma\left(\frac{1}{C}, \alpha^C\right)$ for $G_C(\alpha)$ og får så slutteligt for P :

$$P = \sum_i \frac{P_{i+1} - P_i}{\alpha_{i+1} - \alpha_i} \left[G_C(\alpha_{i+1}) - G_C(\alpha_i) \right], \quad (3.15)$$

funktionen $G_C(\alpha)$ er tabellagt i tabel A6. I tilfælde hvor vi har et spring i effektkurven (vist på fig. 3.1 ved $V_5 = V_6$) giver udtrykket ved grænseovergangen $\alpha_6 \rightarrow \alpha_5$ for bidraget til summen fra $i = 5$:

$$(P_6 - P_5) \cdot \exp(-\alpha_6^C) \quad (3.16)$$

Ved hjælp af udtrykket ovenfor kan vi i princippet beregne middeleffekten svarende til en vilkårlig effektkurve ved blot at inddele i tilstrækkeligt mange lineære stykker. I praksis vil metoden dog kun være anvendelig, såfremt møllens effektkarakteristik med rimelighed kan tilnærmes med nogle få lineære stykker.

For mange vindmøller vil effektkarakteristikken med god tilnærmelse have formen:

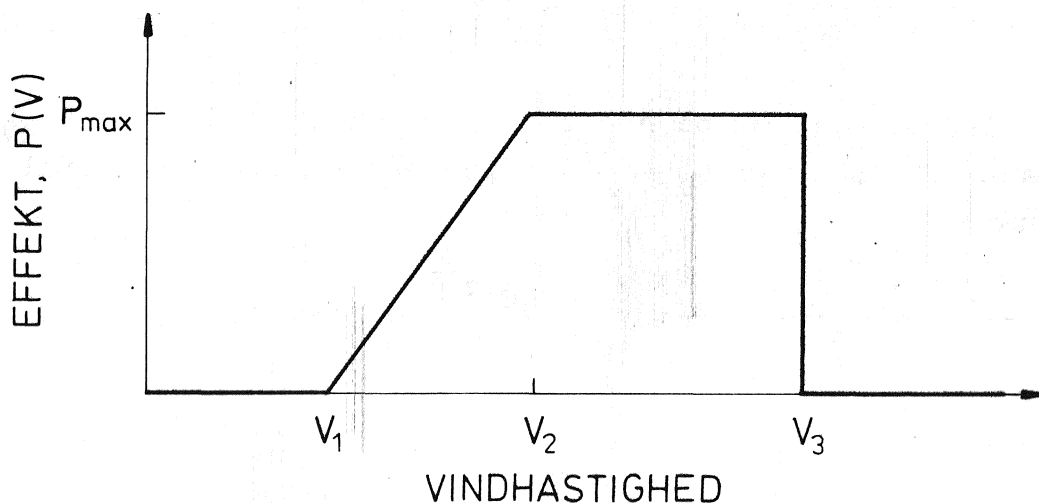


Fig. 3.2. Simpel lineær effektkarakteristik.

Under en vindhastighed V_1 vil møllen ikke kunne køre (start-hastigheden), mellem V_1 og V_2 vokser effekten tilnærmelsesvis

lineært til værdien P_{\max} (mærkeeffekten) ved vindhastigheden V_2 ; derover vil effekten være konstant indtil en (eventuel) maksimal hastighed V_3 , over hvilken møllen må lukkes ned af sikkerhedsmæssige grunde. I dette tilfælde kan middeleffekten beregnes udfra udtrykket:

$$P = P_{\max} \left\{ \frac{1}{\beta - \alpha} (G_C(\beta) - G_C(\alpha)) - \exp(-\eta^C) \right\}, \quad (3.17)$$

hvor

$$\alpha = \frac{V_1}{A}, \quad \beta = \frac{V_2}{A} \quad \text{og} \quad \eta = \frac{V_3}{A}. \quad (3.18)$$

Til brug for denne beregning har vi som før nævnt tabellagt G_C i tabel A6. I praksis vil man ofte kunne negligere det sidste led, idet de meget høje vindhastigheder, ved hvilke møllen må lukkes ned, optræder meget sjældent.

Eksempel 3.7

Gedser møllens karakteristik er målt til at svare meget nøjagtigt til den angivne lineære form med parametrene

$$\begin{aligned} V_1 &= 5.7 \text{ ms}^{-1} \\ V_2 &= 15 \text{ ms}^{-1} \\ P_{\max} &= 200 \text{ kW.} \end{aligned}$$

Navhøjde er 25 m. Vi negligerer det sidste led i P (dvs. $V_3 = \infty$). Gedsermøllen er anbragt ved en vestvendt kyst, og landsektorerne har en ruhed af klasse 2. Vi beregner så først Weibull parametrene for dette tilfælde ved hjælp af skemaet:

SEKTOR/ RUHEDS- klasse	A	C	f	M	V ²	fM	fV ²
N 2	5.1	1.84	0.066	4.53	27.1	0.299	1.79
NØ 2	5.3	1.92	0.092	4.70	28.6	0.432	2.63
Ø 2	6.0	2.23	0.127	5.32	34.6	0.676	4.39
SØ 2	6.2	2.02	0.122	5.49	38.3	0.670	4.67
S 2	7.0	1.95	0.157	6.20	49.5	0.973	7.77
SV 0	9.7	2.06	0.172	8.59	93.0	1.478	16.00
V 0	10.0	2.03	0.198	8.86	99.4	1.754	19.68
NV 0	7.4	1.71	0.089	6.60	59.4	0.587	5.29
			1.02			6.87	62.2
						6.74	61.0
						0.744	

C = 1.76 (tabel A4)

A = 6.74 · F_A(1.76) = 7.6 (tabel A5)

Vi får så

$$\alpha = \frac{5.7}{7.6} = 0.75 \quad \text{og} \quad G_C(\alpha) = 0.612 \quad (\text{tabel A6})$$

$$\beta = \frac{15}{7.6} = 1.97 \quad \text{og} \quad G_C(\beta) = 0.879 \quad (\text{tabel A6})$$

$$\beta - \alpha = 1.22$$

dvs. middeleffekten beregnes som

$$P = 200 \text{ kW} \cdot \frac{1}{1.22} \cdot (0.879 - 0.612) = 44 \text{ kW},$$

den målte effekt (for 1978) er 40 kW.

3.5.1. Effektsandsynlighedskurven

Ved hjælp af effektkarakteristikken og de estimerede Weibull parametre kan vi udover middeleffekten også beregne, hvor stor del af tiden vindmøllen vil yde mere end en given effekt, den såkaldte effektsandsynlighedskurve.

Vi beregner først sandsynligheden for, at møllen kører:

$$P(V > V_1) = \exp\left(-\left(\frac{V_1}{A}\right)^C\right) = \exp(-\alpha^C) \quad (3.19)$$

der næst sandsynligheden for en produktion større end P med P mellem 0 og P_{\max}

$$\Pr(\text{Produktion} > P) = \exp\left(-\left(\frac{V_P}{A}\right)^C\right) \quad (3.20)$$

med

$$P = \frac{P_{\max}}{V_2 - V_1} (V_P - V_1) \quad \text{eller} \quad V_P = V_1 + \frac{P}{P_{\max}} (V_2 - V_1)$$

dvs

$$\Pr(\text{Produktion} > P) = \exp\left[-\left(\alpha + \frac{P}{P_{\max}} (\beta - \alpha)\right)^C\right], \quad (3.21)$$

endelig sandsynligheden for effekten P_{\max}

$$\Pr(\text{Produktion} = P_{\max}) = \exp\left(-\left(\frac{V_2}{A}\right)^C\right) = \exp(-\beta^C) \quad (3.22)$$

Eksempel 3.8

Benytter vi parametrene for Gedser møllen fra forrige eksempel kan vi beregne effektsandsynlighedskurven, og på figur 3.3 er vist henholdsvis den beregnede og en målt kurve. Kurverne viser, at vi kan forvente, at møllen producerer i ca. 55% af tiden, at den giver 100 kW eller derover i ca. 18% af tiden, og at den må forventes at yde fuld effekt i ca. 3% af tiden.

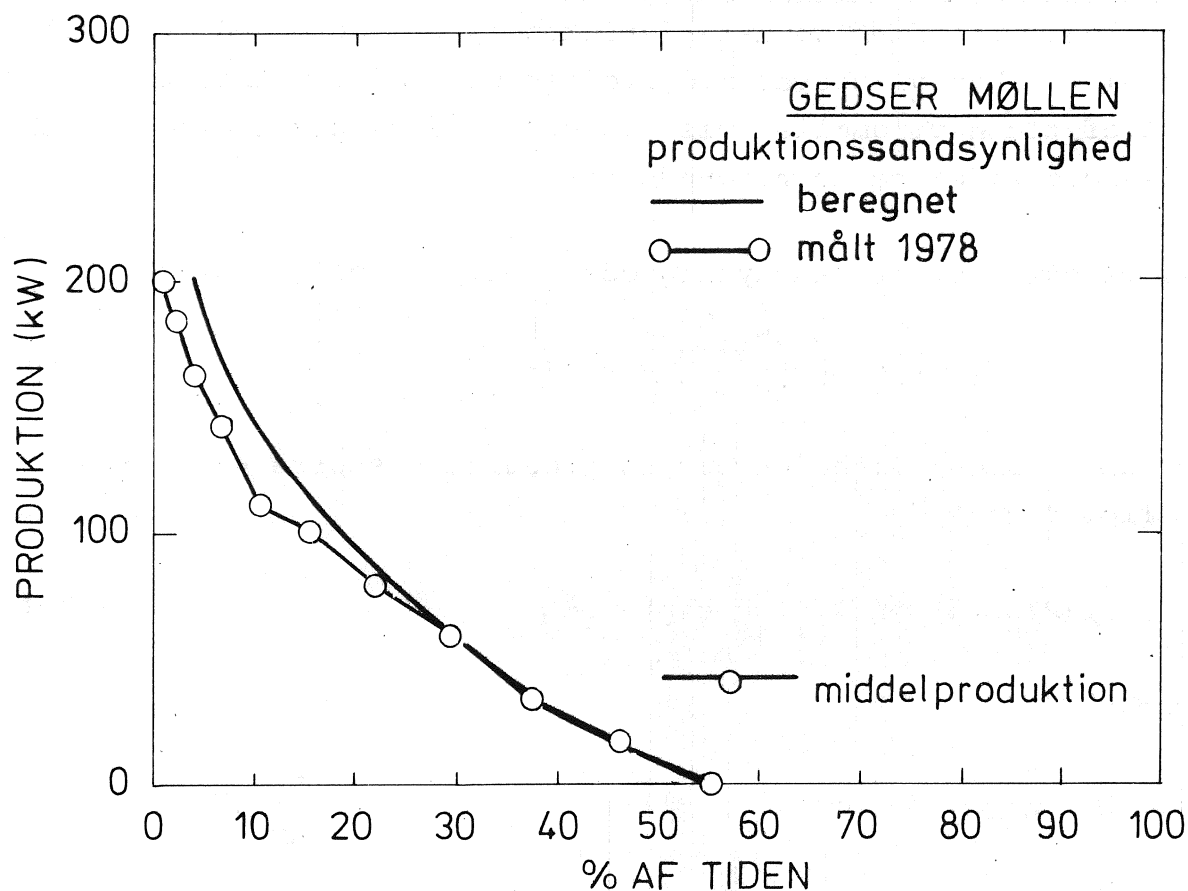


Fig. 3.3. Produktionssandsynlighedskurver for Gedser møllen henholdsvis beregnet og målt.

Eksempel 3.9

En mindre vindmølle tænkes anbragt i et homogent terræn af klasse 1. Møllen har en navhøjde på 18 m og dens effekt-karakteristik er målt til at være meget nær den simple lineære form med parametrene

$$\begin{aligned} \text{starthastighed } V_1 &= 5 \text{ ms}^{-1} \\ \text{mætningshastighed } V_2 &= 12 \text{ ms}^{-1} \\ \text{mærkeeffekt } P_{\text{max}} &= 50 \text{ kW} \end{aligned}$$

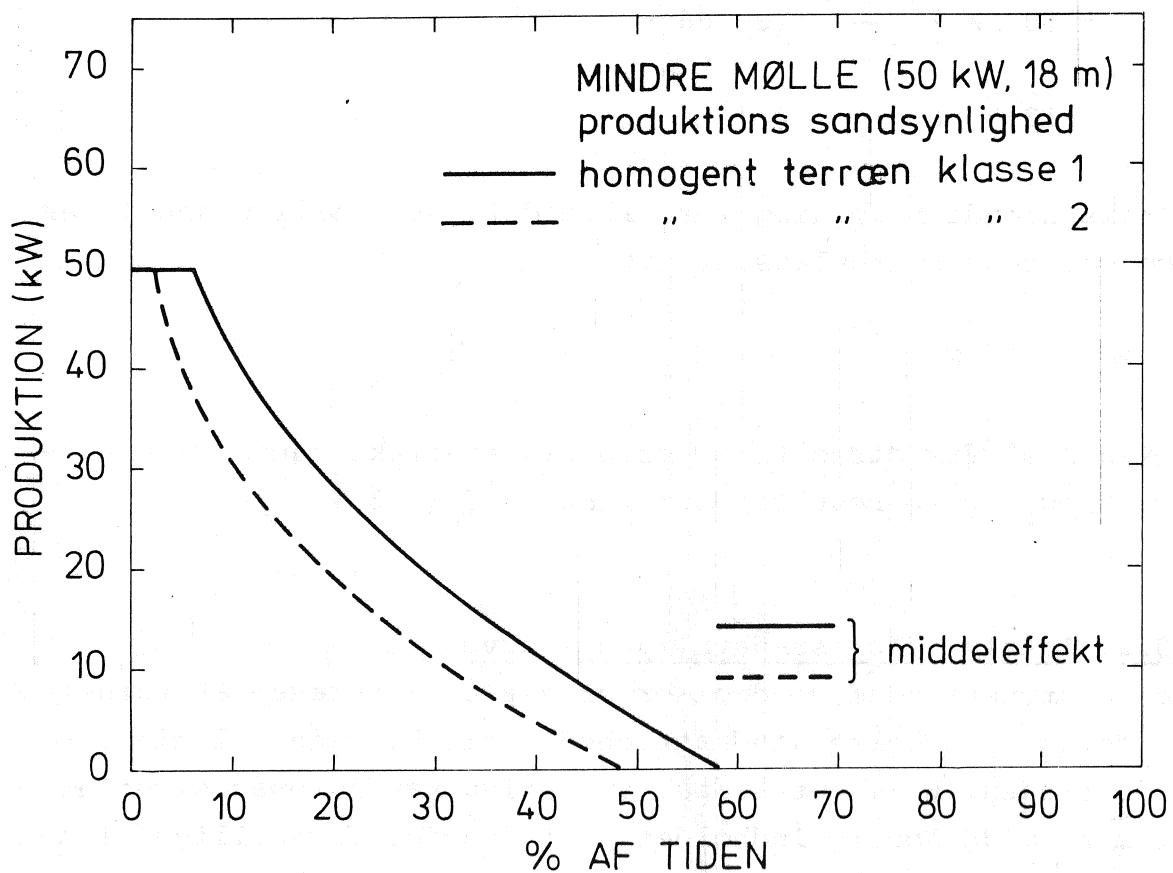


Fig. 3.4. Beregnet produktionssandsynlighedskurver for en mindre vindmølle.

Aflæser vi Weibull parametrene svarende til dette (homogene) tilfælde får vi

$$A = 6.9 \text{ ms}^{-1}$$

$$C = 1.85$$

dvs

$$\alpha = 0.72$$

$$G_C(\alpha) = 0.594$$

$$\beta = 1.74$$

$$G_C(\beta) = 0.866$$

$$\beta - \alpha = 1.02$$

middeleffekten bliver således

$$P = 50 \text{ kW} \cdot \frac{1}{1.02} \cdot (0.866 - 0.594)$$

$$= 13.3 \text{ kW}$$

En tilsvarende beregning for tilfældet, hvor møllen anbringes i homogent terræn af klasse 2 giver

$$P = 8.9 \text{ kW}$$

Vi kan også for disse tilfælde beregne effekt sandsynlighedskurven og får et resultat som vist på fig. 3.4.

3.5.2. Totale effektsandsynlighedskurve

Ved konstruktion af vindmøller er det af interesse at vurdere, hvorledes de enkelte vindhastigheder vil bidrage til middelproduktionen. En meget simpel vurdering kan foretages ved at estimere middelenergiindholdet i vinden for forskellige vindhastigheder. Dette energiindhold er givet som

$$E(V) = \frac{1}{2} \rho V^3 \text{Pr}(V) \quad (3.23)$$

hvor $\text{Pr}(V)$ er Weibull fordelingen svarende til det betragtede tilfælde. En afbildning af denne funktion giver et billede af, ved hvilke vindhastigheder der er energi at hente og dermed hvilke vindhastigheder, der må dimensioneres efter.

Eksempel 3.10

I 10 meters højde over terræn af ruhedsklasse 1 er Weibull parametrene givet som $A=6.2$ og $C=1.79$. Plotter vi nu $E(V)$ i dette tilfælde får vi et resultat som vist i figur 3.5 mærket Vindatlas. I samme plot har vi vist den tilsvarende målte $E(V)$ fra Ålborg lufthavn, hvor vi har et terræn, som må beskrives som homogent klasse 1 (flad græsmark). Vi ser en virkelig god overensstemmelse og afvigelsen i det totale energiindhold (arealet under kurverne) er mindre end 3%.

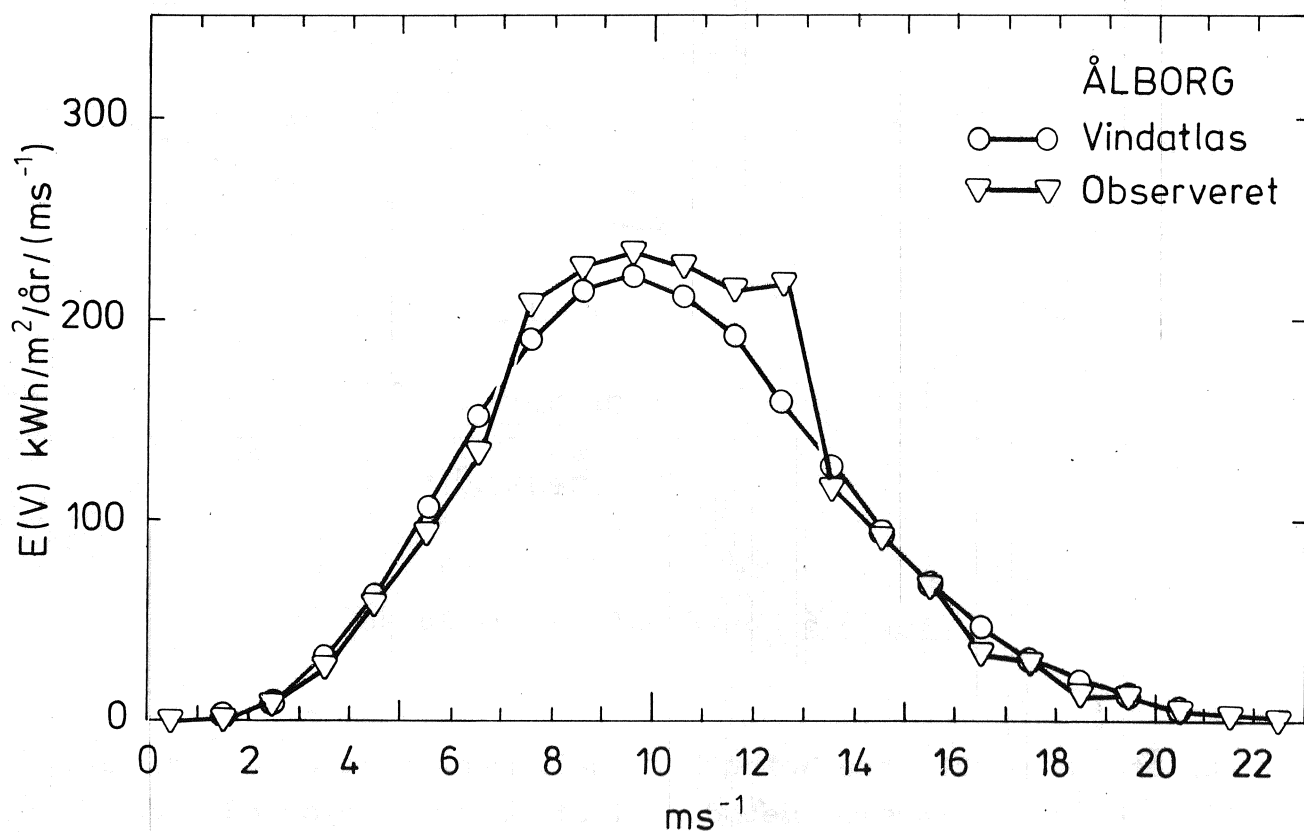


Fig. 3.5. Effektindholdet i vinden som funktion af vindhastigheden i 10 meters højde ved Ålborg lufthavn, henholdsvis målt og beregnet.

3.6. Skift af ruhedsklasse inden for én eller flere sektorer

I de foregående afsnit er det beskrevet, hvorledes Weibull parametrene kan estimeres for den totale vindfordeling i de tilfælde, hvor ruheden ikke er den samme i alle retninger. Vi vil imidlertid ofte være i den situation, at terrænet i en eller flere retningssektorer ikke kan betragtes som ruhedsmæssigt homogent, idet ruheden i en vis afstand fra det betragtede punkt ændres.

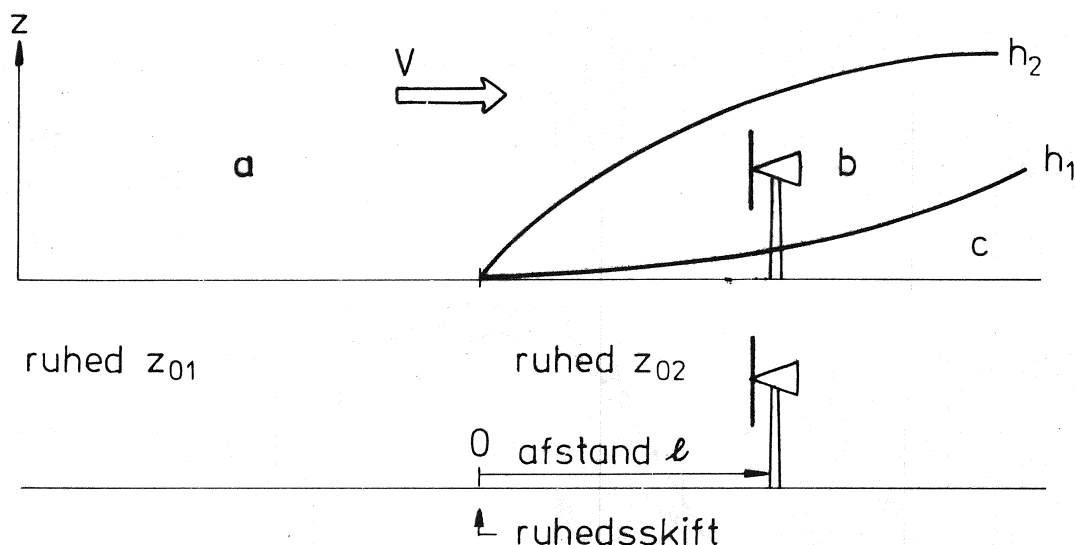


Fig. 3.6. Skift af ruhedsklasse

For at kunne estimere Weibull fordelingsparametre i dette tilfælde må vi have en metode til at beregne, hvorledes de ændrer sig i en given sektor, når vi bevæger os fra det ene terræn til det andet. Med en sådan metode kan vi så fastlægge parametrene i hver retningssektor og derefter ved hjælp af den fremgangsmåde, der er beskrevet i afsnit 3.4, beregne parametrene svarende til totalfordelingen. Metoden, vi har valgt, bygger på den eksperimentelle erfaring, at der ved et skift i terrænets ruhed nedstrøms for ruhedsskiftet opstår et grænselag, hvis højde vokser med afstanden fra ruhedsskiftet. Udenfor grænselaget har vindhastigheden ikke mærket den nye ruhed og er derfor kun afhængig af den opstrøms ruhed. Inden i grænselaget er vinden i en overgangszon bestemt af terrænet både opstrøms og nedstrøms for ruhedsskiftet. I en vis afstand fra ruhedsskiftet og under en vis højde vil vindhastigheden indenfor grænselaget udelukkende være bestemt af den nye ruhed. Den veldokumenterede eksperimentelle erfaring siger at højden af grænselaget vokser op som angivet ved højden h_2 på fig. 3.6. Hvorledes vindhastigheden i overgangszonen i grænselaget afhænger af de to ruheder er ikke helt afklaret. Vi har valgt at indføre et "beregningsgrænselag" hvis opvoksen er givet ved

højden h_1 på fig. 3.6, og som bygger dels på fysiske overvejelser delt på ønsket om en rimelig enkel beregningsmetode.

Luften bevæger sig fra et område med ruhed z_{01} hen over et ruhedsskift til et område med ruhed z_{02} . I området a, der før ruhedsskiftet rækker fra overfladen og opefter og efter ruhedsskiftet ligger over højden h_2 , er vindhastigheden bestemt ved ruheden z_{01} . Tilsvarende har der indstillet sig en ny ligevægts-tilstand i området c, der ligger efter ruhedsskiftet og op til højden h_1 , og vindhastigheden er her bestemt alene af ruheden z_{02} . I mellemområdet b mellem højderne h_1 og h_2 sker en gradvis overgang mellem de to vindhastigheder. Højderne h_1 og h_2 kan aflæses af fig. 3.7, idet man for h_1 går ind på den kurve, der svarer til ruhedsklassen efter ruhedsskiftet, medens h_2 kurven altid bestemmes af den største ruhedsklasse.

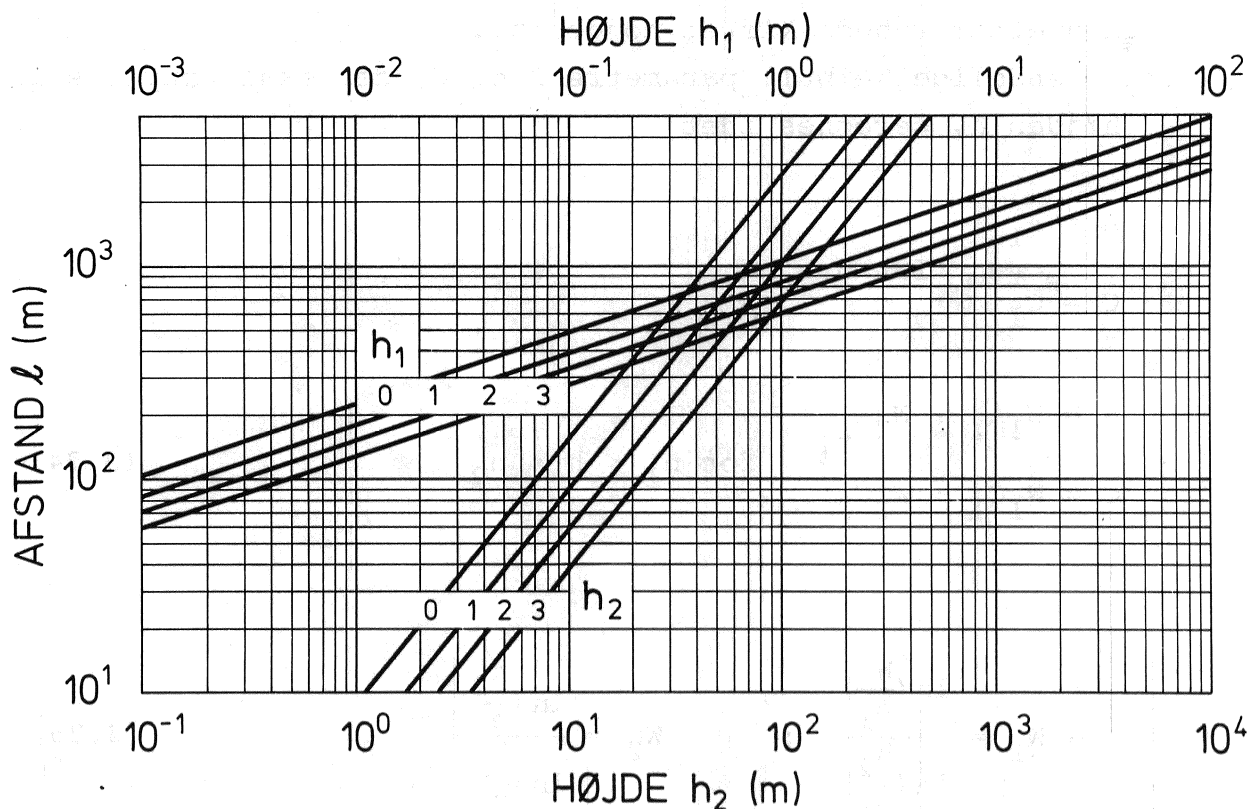


Fig. 3.7. Ruhedsgrænselagets højde h_2 og beregningsgrænselagets højde h_1 som funktion af afstanden l fra ruhedsskiftet.

Kurven for h_1 giver os umiddelbart den mindste afstand L , der kræves for at vi fra højden h ser terrænet som værende af ensartet ruhed, idet L er lig den værdi af ℓ , der svarer til $h = h_1$. Kan terrænet betragtes som homogent ud til afstanden L i en sektor, behøver vi ikke at tage hensyn til eventuelle ruhedsskift på større afstande, idet Weibull fordelingen kun afhænger af den lokale ruhedsklasse i den pågældende sektor. I tilfælde, hvor vi derimod i en sektor har et ruhedsskift nærmere end afstanden L , går vi frem på følgende måde:

- 1) Bestem ruhedsklasse før ruhedsskiftet og aflæs Weibull parametrene A_1 og C_1 svarende til den valgte højde h .
- 2) Bestem ruhedsklasse efter ruhedsskiftet og aflæs Weibull parametrene A_2 og C_2 svarende til højden h .
- 3) Afstanden ℓ til ruhedsskiftet, samt den af ovennævnte ruhedsklasse der har den største ruhed, bestemmer højden h_2 , der aflæses af fig. 3.7. Tilsvarende bestemmer ruhedsklassen efter ruhedsskiftet højden h_1 .
- 4) De endelige Weibull parametre A og C , der skal benyttes i højden h , beregnes idet

$$\left. \begin{array}{l} A = A_1 \\ C = C_1 \end{array} \right\} \quad \text{for } h \geq h_2$$

$$\left. \begin{array}{l} A = W_1 A_1 + W_2 A_2 \\ C = W_1 C_1 + W_2 C_2 \end{array} \right\} \quad \text{for } h_1 < h < h_2 \quad (3.24)$$

$$\text{med } W_1 = \frac{\ln(\frac{h}{h_1})}{\ln(\frac{h_2}{h_1})} ; \quad W_2 = \frac{\ln(\frac{h_2}{h})}{\ln(\frac{h_2}{h_1})} \quad (3.25)$$

$$\left. \begin{array}{l} A = A_2 \\ C = C_2 \end{array} \right\} \quad \text{for } h < h_1$$

- 5) Beregn parametrene A og C for den totale fordeling som i eksempel 3.5 ved benyttelsen af parametrene bestemt under punkt 1 til punkt 4.

Eksempel 3.11

Vi ser på en situation, hvor vi har valgt en mølleplacering ved en vestvendt kyst. Vi tænker os en navhøjde på 25 m og ønsker at placere møllen 500 meter fra kystlinjen.

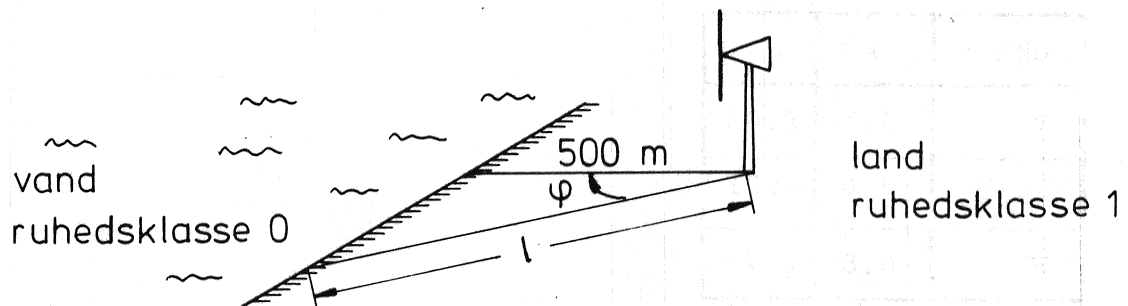


Fig. 3.8. Ruhedsskift ved kyst

Vi bestemmer først afstanden til ruhedsskiftet for hver af sektorerne ved at benytte afstanden i sektorens midte:

$$l = 500 \text{ m} \cdot \frac{1}{\cos \phi}$$

og får

sektor	N	NØ	Ø	SØ	S	SV	V	VV
l	-	-	-	-	-	708	500	708

Vi ser altså, at vi i de fem sektorer N til S skal bruge Weibull parametrene svarende til landruheden, og i de tre vestlige sektorer skal vi benytte korrektionsproceduren til beregning af parametrene. Vi får følgende skema:

Sektor	Ruhedskl.0		Ruhedskl.2		(m)		W ₁	W ₂
	A ₁	C ₁	A ₂	C ₂	h ₁	h ₂		
SV	9.7	2.06	7.2	2.02	1.0	76	0.74	0.26
V	10.0	2.02	7.3	1.94	0.35	56	0.84	0.16
NV	7.4	1.72	5.1	1.66	1.0	76	0.74	0.26

Sektor	A	C
SV	9.1	2.05
V	9.6	2.01
NV	6.8	1.70

Vi beregner parametrene til den totale fordeling ved hjælp af skemaet i eksempel 3.5:

SEKTOR/ RUHEDS- klasse	A	C	f	M	V^2	fM	fV^2
N 2	5.1	1.84	0.066	4.53	27.1	0.299	1.79
NØ 2	5.3	1.92	0.092	4.69	28.6	0.431	2.63
Ø 2	6.0	2.23	0.127	5.32	34.6	0.676	4.39
SØ 2	6.2	2.02	0.122	5.49	38.3	0.670	4.67
S 2	7.0	1.95	0.157	6.20	49.5	0.973	7.77
SV 0-2	9.1	2.05	0.174	8.06	82.0	1.402	14.27
V 0-2	9.6	2.01	0.195	8.51	92.0	1.659	17.94
NV 0-2	6.8	1.70	0.086	6.07	50.3	0.522	4.33
			1.02			6.63	57.8
						6.50	56.7
						0.745	

A = 7.3
C = 1.77

$$\frac{M^2}{V^2} =$$

Dette resultat kan sammenlignes med resultatet i eksempel 3.6, hvor vi gennemregnede den samme situation blot med den forskel, at vi betragtede et punkt på kystlinien. Vi ser, at 500 m inde i landet er parametrene kun ændret lidt fra værdien ved kystlinien. Sammenligner vi det totale energiindhold, ser vi en reduktion på 9% i indlandsplaceringen sammenlignet med kystplaceringen. Af hensyn til placeringsovervejelser af større vindmøller er det af interesse at vurdere reduktionen i vindkraftspotentialet ved placeringer i en vis afstand fra kystlinien, og vi har derfor gennemført beregninger efter skemaet ovenfor for forskellige orienteringer af kystlinien og afstande til kysten. På fig. 3.9 er resultaterne vist som kurver, der giver ændringen af det totale energiindhold i højden 50 m over terræn.

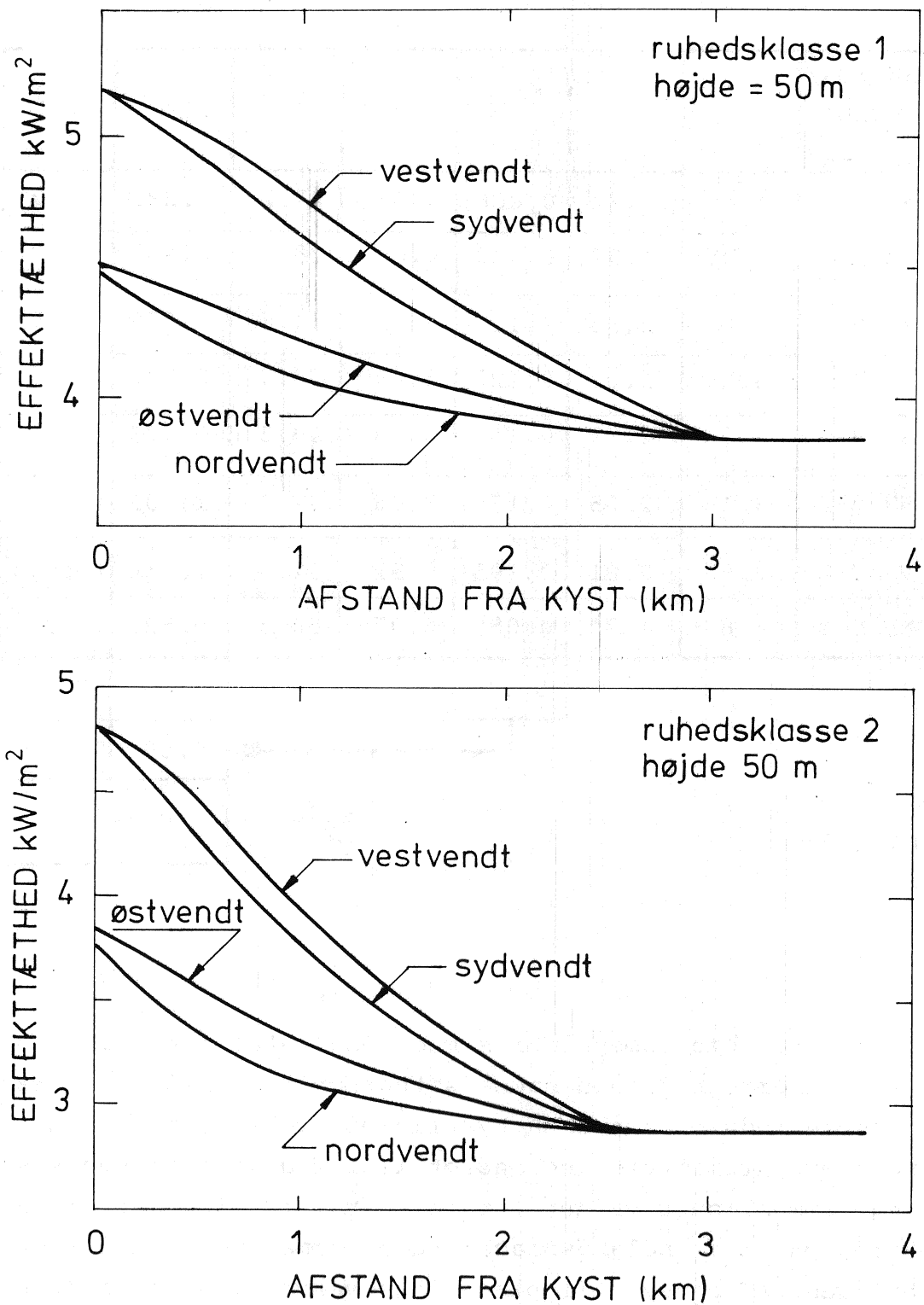


Fig. 3.9. Effekttætheden i vinden i 50 m højde som funktion af afstanden til en kyst. Øverst for landruhed af ruhedsklasse 1 og nederst ruhedsklasse 2. I hver figur er vist effekttætheden for fire orienteringer af kystlinien.

3.7. Bestemmelse af middeleffekt. Valg af mølleparametre

Til mange formål er en simpel beregningsmetode til bestemmelse af middelproduktion nyttig. I afsnit 3.5 blev det vist, hvorledes middelproduktionen enkelt kan bestemmes udfra kendskab til Weibull parametrene, når møllens effektkarakteristik er givet som en stykvis lineær funktion af vindhastigheden, jfr. fig. 3.2. I dette afsnit vil vi se på, hvorledes middelproduktionen for en mølle dels afhænger af møllespecifikke størrelser og dels af vindens sandsynlighedsfordeling, det vil sige Weibull parametrene A og C.

Effektiviteten af en vindmølle defineres som forholdet mellem den afgivne effekt $P(V)$ og den energi $E(V)$, der pr. tidsenhed strømmer gennem rotorplanet. Med den simple lineære effektkarakteristik bliver effektiviteten for $V_1 \leq V \leq V_2$ givet ved

$$\epsilon(V) = \frac{P(V)}{E(V)} = \frac{k(V-V_1)}{\frac{1}{2}\rho V^3 \cdot A_R} \quad (3.26)$$

hvor A_R er rotorarealet og k er hældningskoefficienten ($k = P_{\max}/(V_2-V_1)$). Effektivitetskurven har et maksimum, som kan bestemmes ved differentiation:

$$\frac{d\epsilon}{dV} = \frac{k}{\frac{1}{2}\rho A_R} \cdot \left(-\frac{2}{V^3} + \frac{3V_1}{V^4} \right).$$

Den maksimale effektivitet forekommer ved den vindhastighed, hvor dette udtryk er nul. Kaldes denne vindhastighed V_m , får vi

$$V_m = \frac{3}{2} V_1 \quad (3.27)$$

Tænker vi os nu, at vi kender værdien af den maksimale effektivitet $\epsilon_m = \epsilon(V_m)$, kan vi udtrykke effektkurvens hældning som

$$k = \frac{3}{2} \rho \epsilon_m \cdot A_R \cdot V_m^2. \quad (3.28)$$

Effektkarakteristikken kan dermed skrives som

$$P(V) = \frac{3}{2} \rho \epsilon_m A_R \cdot V_m^2 \cdot (V - V_1) \text{ for } V_1 \leq V \leq V_2, \quad (3.29)$$

hvilket indsat i lign. (3.17) giver følgende udtryk for middelproduktionen

$$P = \left[\frac{1}{2} \rho \epsilon_m A_R \cdot A^3 \right] \cdot \left[3 \left(\frac{V_m}{A} \right)^2 \cdot \left\{ G_C \left(\frac{V_2}{A} \right) - G_C \left(\frac{2}{3} \frac{V_m}{A} \right) \right\} \right]. \quad (3.30)$$

Dette udtryk indeholder parametre, der på simpel måde beskriver møllen:

A_R = rotorareal

ϵ_m = maksimal effektivitet

V_m = vindhastigheden ved hvilken der er maksimal effektivitet

V_2 = vindhastigheden ved hvilken effektkurven skifter fra at være voksende til at være konstant.

3.7.1. Maksimalisering af middelproduktion

Udtrykket for middelproduktionen består af et produkt af to størrelser $P = S \cdot K$ hvor

$$S = \frac{1}{2} \rho \epsilon_m A^3 \cdot A_R \quad (3.31)$$

$$K = 3 \alpha_m^2 \cdot \left\{ G_C(\alpha_m + \delta) - G_C\left(\frac{2}{3} \alpha_m\right) \right\} \quad (3.32)$$

med

$$\alpha_m = \frac{V_m}{A} ; \quad \beta = \frac{V_2}{A} \equiv \alpha_m + \delta. \quad (3.33)$$

Lign. (3.33) definerer størrelsen δ som vi benytter nedenfor. S er en skalaenergi, som afhænger af skalahastigheden A samt af den maksimale effektivitet ϵ_m og af rotorarealet A_R . K afhænger af effektkurvens form, og det anførte udtryk gælder kun, når effektkurven har den stykvisse lineære form. Den mest fordelagtige form af effektkurven med hensyn til middelproduktionen er den, hvor møllen har maksimal effektivitet ved alle

vindhastigheder. I dette tilfælde bliver effektkurven proportional med V^3 og formfaktoren K bliver kun afhængig af C :

$$K = \Gamma(1 + \frac{3}{C}) . \quad (3.34)$$

Sammenligner vi de to udtryk for middelproduktionen, og antager at vi kan vælge optimale værdier for α_m og δ , vil vi kunne opnå en relativ godhed af den lineære effektkurve, således at middelproduktionen bliver mellem 70% og 75% af den optimale. Dette betyder, at man ved at vælge α_m og δ passende kunne opnå, at middeleffektiviteten for en mølle med lineær effektkurve vil være 70 til 75% af den maksimale effektivitet. Dette under forudsætning af at vi kan vælge α_m og δ uafhængigt af ϵ_m . Det optimale valg af samhørende værdier af α_m og δ er det, der gør K maksimal. For store værdier af δ kan man vise, at den optimale værdi af α_m bliver

$$\alpha_m = \left(\left(\frac{C+2}{C} \right)^{\frac{1}{C}} - 0.15 \right) \quad (3.35)$$

Dette udtryk er ikke eksakt, men gælder med god nøjagtighed for relevante værdier af C . Første led i parantesen angiver den vindhastighed, skaleret med A , hvor der er maksimum i effekttætheden i vinden, jfr. fig. 3.5 og appendiks C. Udtrykket viser således, at møllens maksimale effektivitet skal vælges ved en vindhastighed noget lavere end svarende til maksimum i vindens effekttæthed. For mindre værdier af δ vil den optimale værdi af V_m ligge nærmere maksimum i vindens effekttæthed som det kan ses på figurerne (3.10). Hver figur svarer til én C værdi, og viser K som funktion af α_m og δ . Den stiplede linie angiver den optimale α_m -værdi for hver δ -værdi, og de fuldt optrukne linier er linier for samme værdi for K . Figurerne kan benyttes direkte til beregning af middelproduktion, idet K aflæses for de relevante værdier af α_m og δ , og P beregnes derefter udfra $P = S \cdot K$.

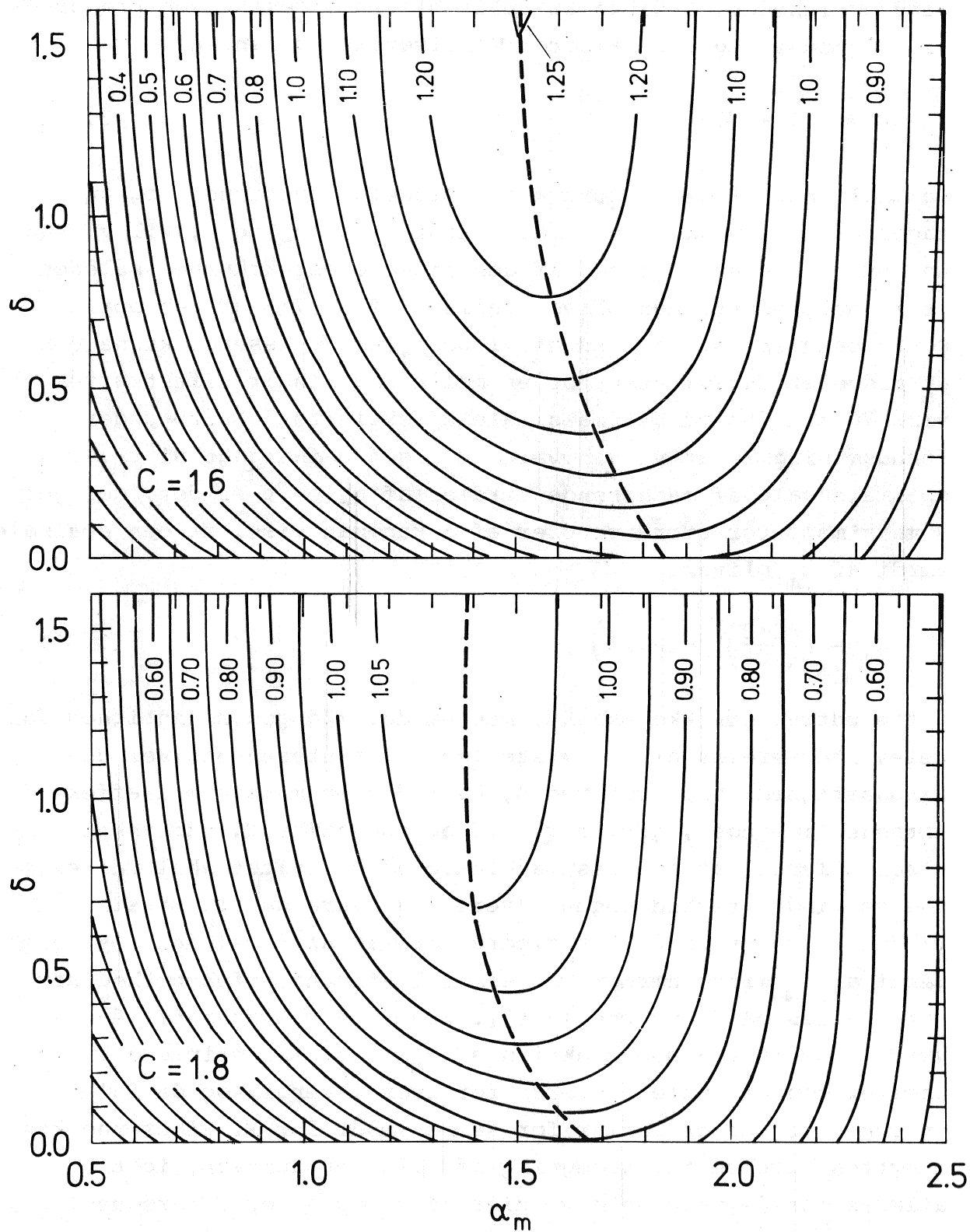


Fig. 3.10. Formfaktoren K , som funktion af α_m og δ , vist for fire værdier af C parameteren (1.6, 1.8, 2.0 og 2.2.). De fuldt optrukne kurver er linier med konstant værdi af K . Den stiplede kurve angiver den optimale α_m værdi for hver værdi af δ .

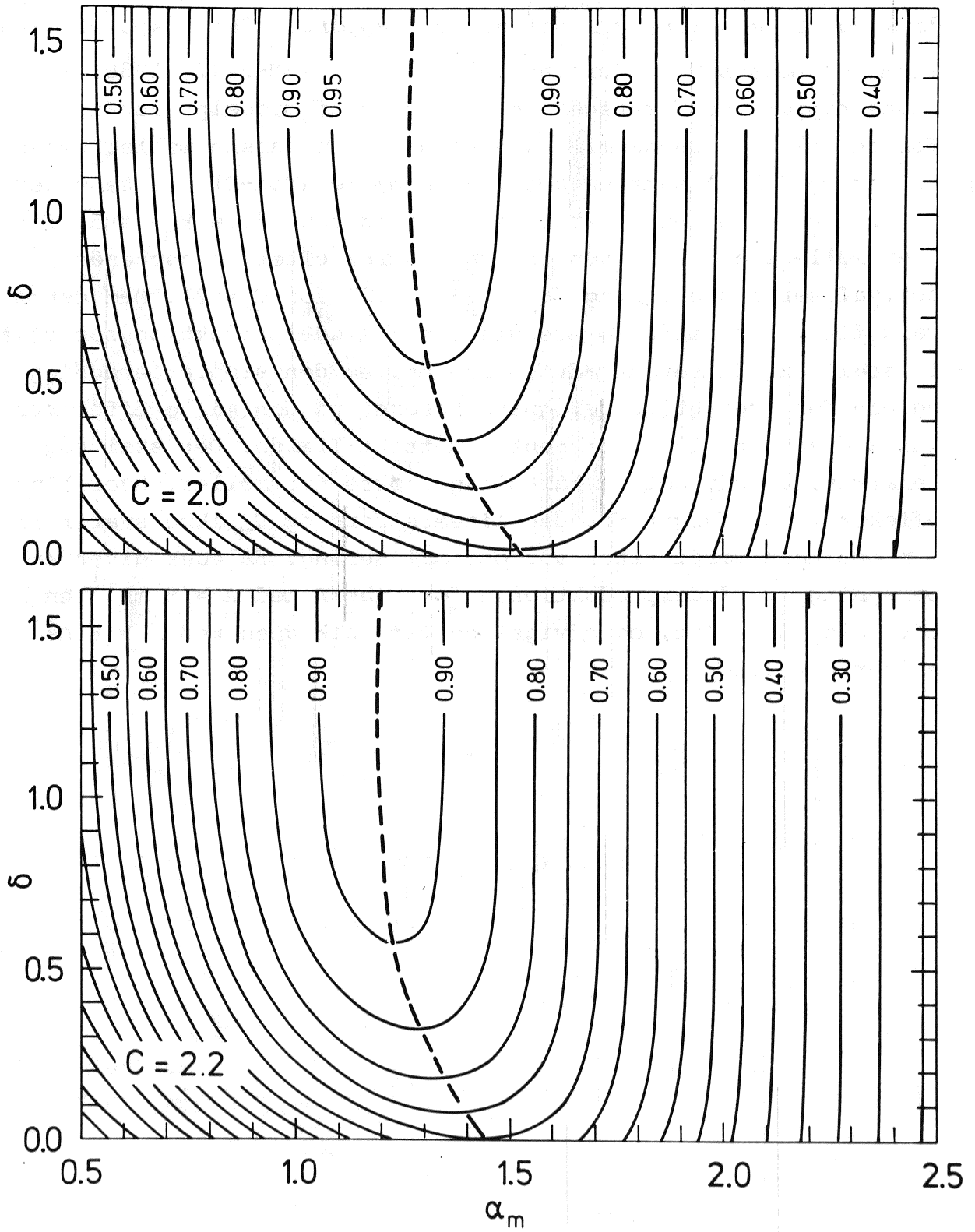


Fig. 3.10. Fortsat.

Eksempel 3.12

Som eksempel på beregning af middelproduktion har vi her taget data for fire større vindmøller fra rapporten "Analysis of data from the Gedser Wind Turbine 1977-79", Risø-M-2242, 1980. I denne rapport er foretaget en beregning af middelproduktionen for en svensk forsøgsmølle (Kalkugnen), de danske møller Gedsermøllen og Nibe-A samt en amerikansk mølle (Mod-O). Vi benytter $C = 2$, og vælger en A værdi, således at den målte V_m -værdi for hver mølle svarer til den optimale værdi efter ovenstående optimaliseringsberegning ($\alpha_m = \frac{V_m}{A} = 1.26$ for $C = 2$). Med dette valg får vi parametre og resulterende middelproduktion som vist i tabel 3.2. Vi ser at afvigelsen mellem den simple beregning og den mere nøjagtige beregning baseret på den målte effektkurve kun andrager nogle få procent i dette tilfælde. Det skal dog bemærkes, at afvigelsen kan blive større for møller, hvor både effektkurven afviger fra den lineære form og V_m ikke svarer til den optimale værdi efter vor optimalisering. Således giver en beregning af middelproduktionen for Nibe-A med $A = 8 \text{ ms}^{-1}$ en afvigelse Δ på 15%, og afvigelsen for Kalkugnen med $A = 6 \text{ ms}^{-1}$ bliver $\Delta = 22\%$.

Tabel 3.2. Beregning af middelproduktion som $P = S \cdot K$ hvor $S = \frac{1}{2} \rho \epsilon_m A^3 \cdot A_R$ og K er aflæst fra fig. 3.10.

Mølle	A ms^{-1}	C	* V_m ms^{-1}	* V_2 ms^{-1}	* A_R m^2	* ϵ_m	α_m	δ	S kW	K	P kW	P' kW	* P_m	Δ
Kalkugnen	7.5	2.	9.5	11	254	0.32	1.26	0.21	21	0.83	17	28	19	11
Gedser	6.8	2.	8.5	15.5	452	0.32	1.26	1.02	28	0.95	27	37	28	4
Nibe-A	8.7	2.	11	15	1257	0.29	1.26	0.46	148	0.92	136	197	149	9
Mod-OA	6.0	2.	7.5	9.5	1134	0.33	1.26	0.32	50	0.88	44	66	49	10

P = beregnet middelproduktion udfra de anførte parametre og antagelse af lineær karakteristik

P' = tilsvarende middelproduktion hvis møllen kørte med maksimal effektivitet ved alle vindhastigheder

P_m = middelproduktion beregnet udfra den målte effektkurve

Δ = den relative afvigelse i procent mellem P og P_m ($\Delta = (P_m - P)/P_m \times 100\%$)

Øvrige symboler er forklaret i teksten.

Parametre mærket med * er taget fra "Analysis of Data from the Gedser Wind Turbine 1977-1979"

Bemærk at de anvendte vindfordelinger afviger fra de virkelige vindfordelinger på de fire lokaliteter. Af denne grund afviger de her angivne middeleffekter fra de faktiske.

3.7.2. Metodens anvendelse ved forstudier

Den i det foregående afsnit beskrevne beregningsmetode kan være til hjælp ved indledende undersøgelser af mulighederne for anvendelse af vindkraft.

Ved sådanne undersøgelser anvendes ofte den nærliggende fremgangsmåde at beregne middelproduktionen af én eller flere allerede eksisterende (eventuelt kun projekterede) vindmøller, for derefter at vælge den mølle som passer bedst til formålet.

Det kan imidlertid være ønskeligt at tage udgangspunkt i den ønskede middelproduktion og herudfra opstille et sæt specifikationer, som kan søges opfyldt. Dette kan opnås ved hjælp af lign. (3.30) og (3.35). Fremgangsmåden vil da være, at den ønskede middelproduktion besluttet, og derefter udvælges møllens placering. Når placeringen er fastlagt, må en navhøjde vælges, hvorefter næste skridt er at beregne vindfordelingens to parametre A og C . Hvis det antages, at afskæringseffekten er tilstrækkelig høj, kan den mest hensigtsmæssige værdi af V_m - hvilket er den værdi, der giver den største middelproduktion - beregnes ud fra lign. (3.35), idet $\alpha_m = \frac{V_m}{A}$. Størrelsen K fås ved at indsætte en realistisk værdi af V_2 i lign. (3.32). Normalt vil V_2 være af størrelsesordenen 12 til 15 m/s. Den maksimale effektivitet ϵ_m er en parameter, der i det væsentlige vil være bestemt ved vindmøllens type, og det er således nødvendigt på dette trin at skaffe sig oplysninger om realistiske værdier for ϵ_m (for hurtigløbere er denne typisk af størrelsesordenen 0.25-0.35).

Med kendt P (den ønskede middelproduktion) kan det nødvendige rotorareal A_R beregnes. Det er nu muligt, at rotordiameteren står i urealistisk forhold til den valgte navhøjde, hvorfor en ny gennemregning er nødvendig.

Vi er derefter nået frem til følgende krav til den ønskede mølle: H (navhøjde), A_R og V_m , mens ϵ_m og V_2 oftest vil være givet (for V_2 's vedkommende af generatorstørrelse og/eller rotorens aerodynamik). Man har herefter det første - omend grove - estimat på en hensigtsmæssig vindmølle. Såfremt an-

tagelsen om lineær effektkurve og antagelsen om, at V_2 er tilstrækkelig stor i forhold til V_m , holder stik, så vil vindmøllen tillige være optimal i det aktuelle terræn med den valgte navhøjde.

Resumé af fremgangsmåde:

- 1) Beslutning om middelproduktion P .
- 2) Valg af placering samt navhøjde.
- 3) Beregning af Weibull fordelings parametre A og C .
- 4) Beregning af den vindhastighed som skal svare til maksimal effektivitet V_m ved hjælp af lign. (3.35).
- 5) Fremskaffelse af oplysninger om realistiske værdier for ϵ_m og V_2 .
- 6) Opslag i tabel $G_C\left(\frac{V_2}{A}\right)$ og $G_C\left(\frac{2}{3} \frac{V_m}{A}\right)$.
- 7) Beregning af det nødvendige rotorareal ved hjælp af lign. (3.30).
- 8) Hvis rotorarealet er urealistisk i forhold til navhøjden, omregnes der fra punkt 2. Rotordiameteren bør nok ligge mellem H og $H/2$.
- 9) Når den endelige møllekonstruktion foreligger, beregnes den korrekte middelproduktion som beskrevet i afsnit 3.5.

Hvis vindmøllen allerede eksisterer, så er V_m , ϵ_m , A_R og H givet på forhånd, hvorfor lign. (3.30), som vist ovenfor, kan bruges til at give et overslag på middelproduktionen, hvis man ikke ønsker at foretage den mere detaljerede (og korrekte) gennemregning. Hvis møllen arbejder med konstant effektivitet forsimples hele beregningen, idet middeleffektiviteten vil være den samme for enhver placering.

I det væsentlige kommer møllens tilpasning til det aktuelle terræn til udtryk i forskellen mellem den optimale V_m beregnet ved lign. (3.35) og den faktiske V_m . En mindre afvigelse vil dog ikke have den store betydning, jfr. afsnit 3.7.1.

Det skal understreges, at den her skitserede metode er ment til overslagsberegninger, som altid bør følges op af mere nøjagtige beregninger, når den endelige middelproduktion bestemmes.

Eksempel 3.13

En forbruger skønner sit behov til 30.000 kWh pr. år, hvilket svarer til middeleffekten

$$(1) P_m = 30.000/8760 \text{ timer} = 3.42 \text{ kW} = 3420 \text{ W}$$

Terrænet, hvor møllen tænkes placeret er homogent, klasse 1.

(2) Navhøjden sættes til 10 m.

(3) I appendiks A aflæses A og C:

$$A = 6.2 \text{ og } C = 1.79.$$

V_m beregnes ved lign. (3.35):

$$(4) \alpha_m = \left(\left(\frac{3.79}{1.79} \right)^{\frac{1}{1.79}} - 0.15 \right) = 1.37 \Rightarrow V_m = 1.37 \cdot A = 8.5 \text{ m/s.}$$

(5) Møllen tænkes at være en hurtigløber-type med $\epsilon_m = 0.3$ og $V_2 = 14 \text{ m/s.}$

(6) I tabel A6 findes $G_C\left(\frac{V_2}{A}\right)$ og $G_C\left(\frac{2}{3} \frac{V_m}{A}\right)$:

$$G_C\left(\frac{V_2}{A}\right) = 0.89 \quad \text{og} \quad G_C\left(\frac{2}{3} \frac{V_m}{A}\right) = 0.69.$$

Herefter kan K beregnes:

$$K = 3 \left(\frac{V_m}{A} \right)^2 \left\{ G_C\left(\frac{V_2}{A}\right) - G_C\left(\frac{2}{3} \frac{V_m}{A}\right) \right\} = 1.13.$$

(7) Det nødvendige rotorareal bestemmes nu af lign. (3.34) idet

$$A_R = P_m / \left(\frac{1}{2} \rho A^3 \cdot \epsilon_m \cdot K \right) = 69 \text{ m}^2 \quad \text{dvs.} \quad R = 4.7 \text{ m.}$$

En mulig løsning kunne således være en mølle med navhøjde 10 m, $V_m \sim 8.5 \text{ m/s}$, $\epsilon_m = 0.3$, $V_2 = 14 \text{ m/s}$ og radius $R = 4.7 \text{ m}$.

SYMBOLLISTE

V	vindhastighed
G	geostrofisk vind (fri vind)
z_0	ruhedslængde
p	tryk
ρ	luftens massefylde
f	coriolisparameter
t	tid
H	navhøjde
h, h_1, h_2	højder
L, ℓ	længder
$Pr(x)$	hyppighedsfordeling, sandsynlighedstæthedsfunktion
$F(x)$	akkumuleret hyppighedsfordeling
M	middelværdi
V^2	middelkvadrat
A	skalaparameter i hyppighedsfordeling (Weibull)
C	formparameter i hyppighedsfordeling (Weibull)
$\exp(x)$	exponentialfunktionen
$\ln(x)$	naturlige logaritmefunktion
$\Gamma(x)$	gammafunktion
$\gamma(x,y)$	ufuldstændige gammafunktion
$E(V)$	effekttæthed ved vindhastighed V
$P(V)$	effektkarakteristik. En vindmølles afgivne effekt ved vindhastigheden V
P	middelenergiproduktion af en given vindmølle
P_{\max}	mærkeeffekt
E	totale middeleffekttæthed
$\epsilon(V)$	en mølles effektivitet ved vindhastighed V
ϵ_m	maksimal effektivitet
A_R	rotorareal
V_1	starthastighed
V_2	vindhastighed ved hvilken effektkurven skifter fra at være voksende til at være konstant
V_m	vindhastighed ved hvilken der er maksimal effektivitet

APPENDIKS A

Weibull parameter kurveblade og tabeller

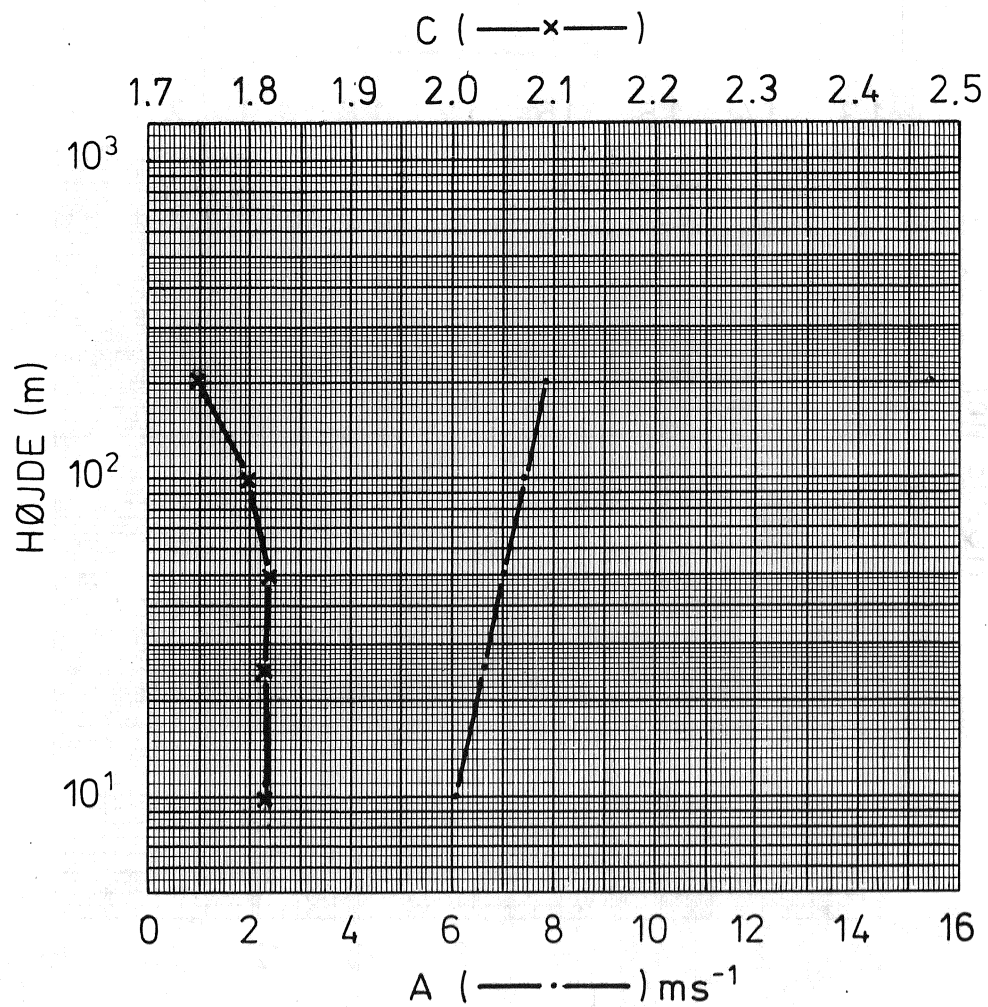
Weibull parametrene svarende til en valgt ruhedsklasse og en valgt vindretningssektor kan aflæses af de efterfølgende 36 kurveblade. På disse kurveblade er øverst angivet, hvilken sektor der refereres til, den hyppighed hvormed vinden optræder i den pågældende sektor samt ruhedsklasse. Weibull parametrene A og C aflæses henholdsvis på den nederste og øverste vandrette skala ud for den valgte højde over terræn (lodrette skala). De afsatte punkter angiver de beregnede værdier i højderne henholdsvis 10, 25, 50, 100 og 200 m.

For hver ruhedsklasse er foruden kurveblade svarende til de otte retningssektorer separat modtaget et kurveblad, der viser Weibull parametrenes højdevariation for vinden fra alle retninger i det specielle tilfælde, at terrænet er homogent, dvs. alle sektorer har samme ruhed svarende til den anførte ruhedsklasse.

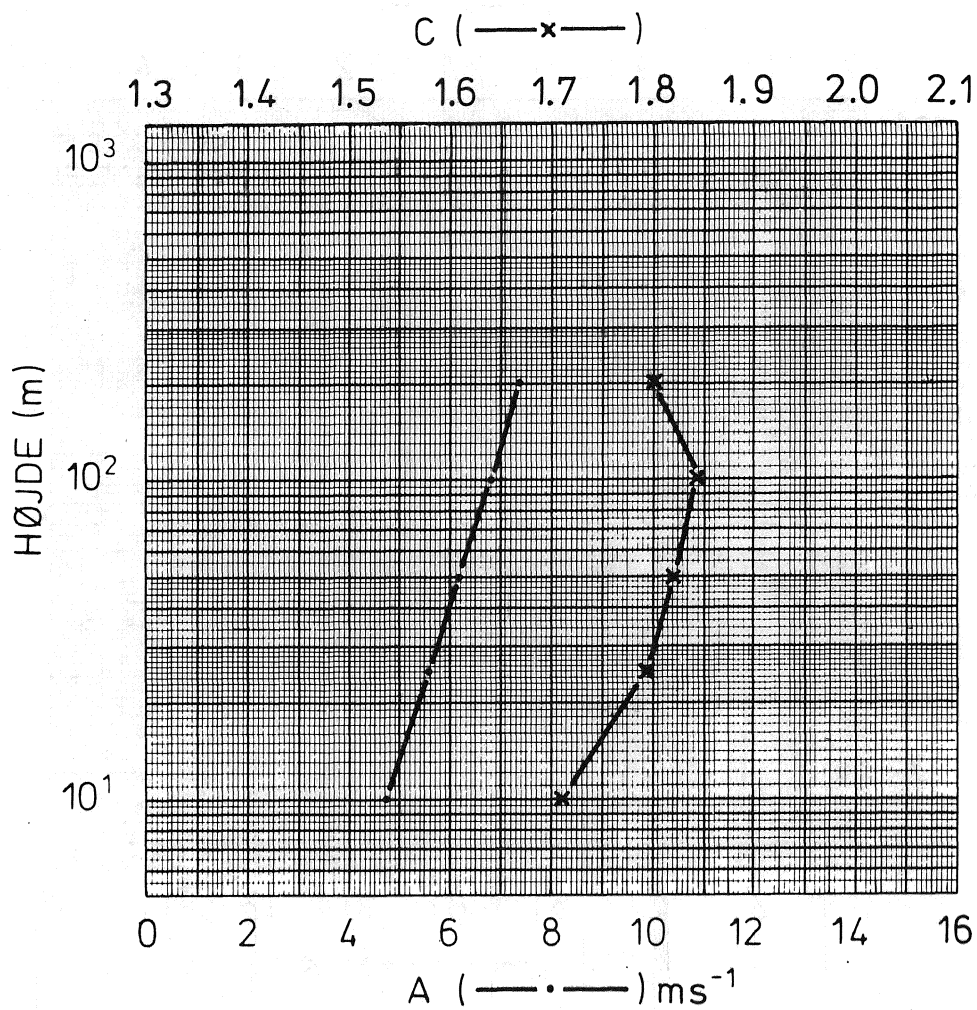
På sidstnævnte fire kurveblade er også angivet A og C for den geostrofiske vind, idet disse værdier arbitrært er afsat ud for højden 1000 m og kurvernes forlængelse til disse værdier er vist ved stiplede linier.

Brugen af de efterfølgende tabeller er beskrevet i kapitel 3.

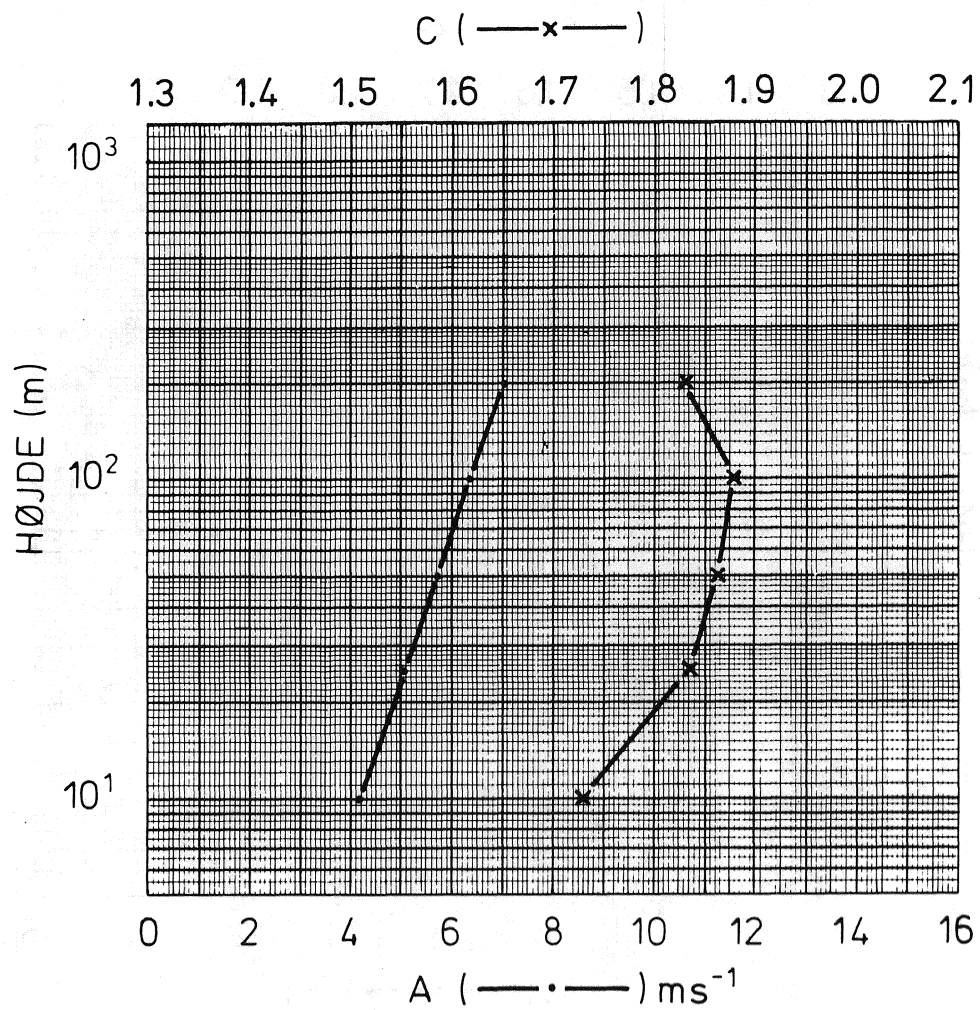
SEKTOR: N
RUHEDSKLASSE: 0
HYPPIGHED f 6.1 %



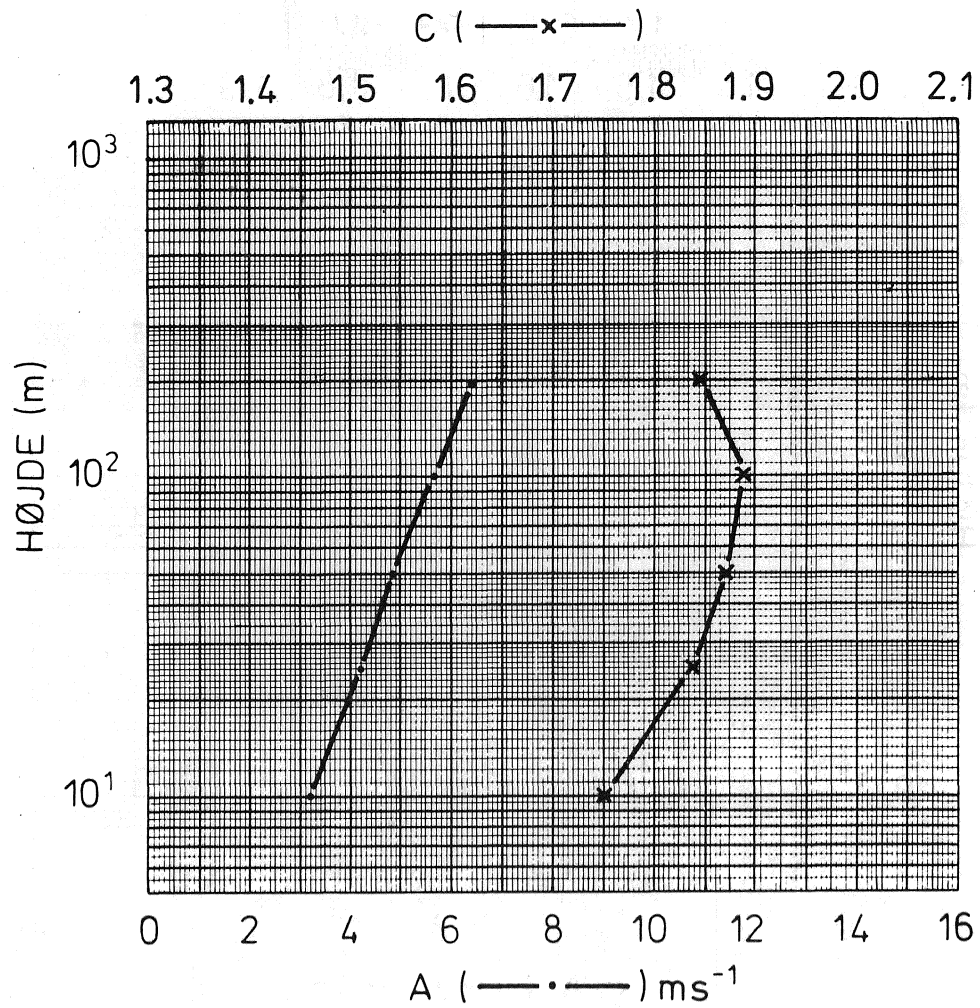
SEKTOR: N
RUHEDSKLASSE: 1
HYPPIGHED f: 6.5 %



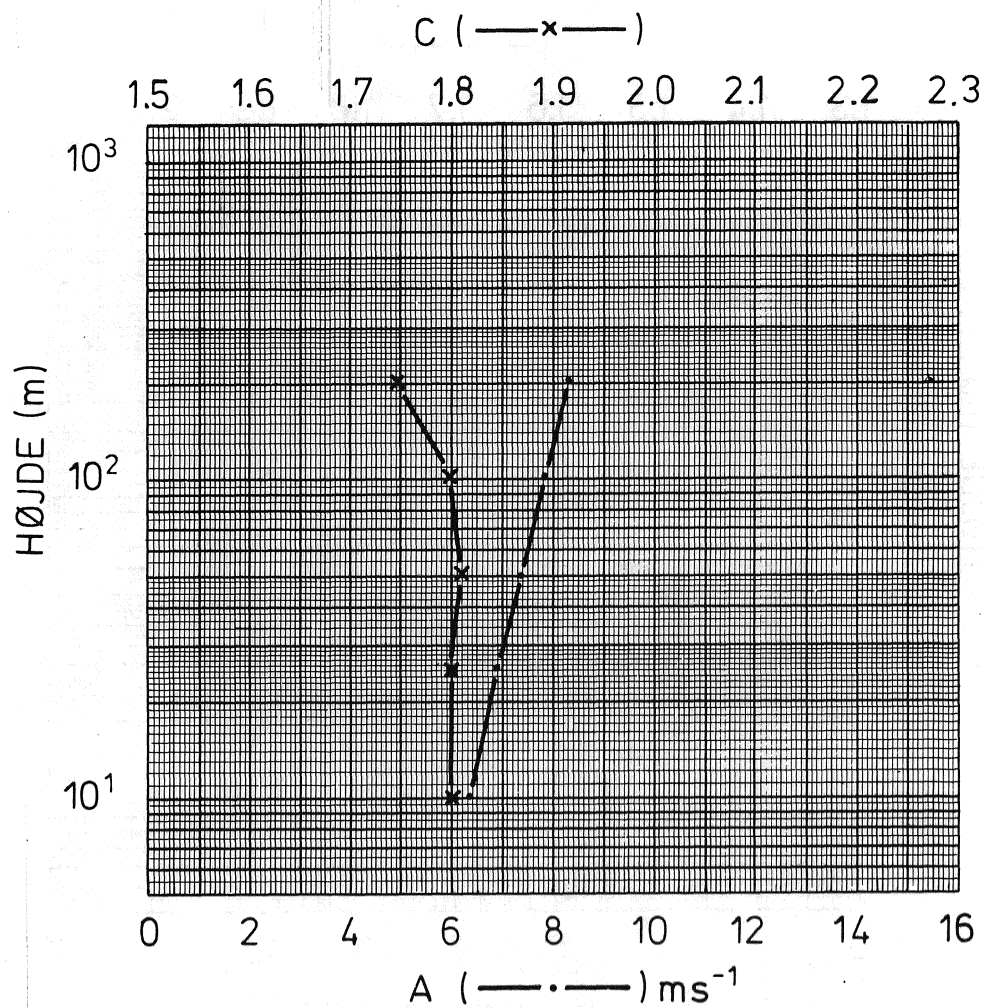
SEKTOR: N
RUHEDSKLASSE: 2
HYPPIGHED f: 6.6%



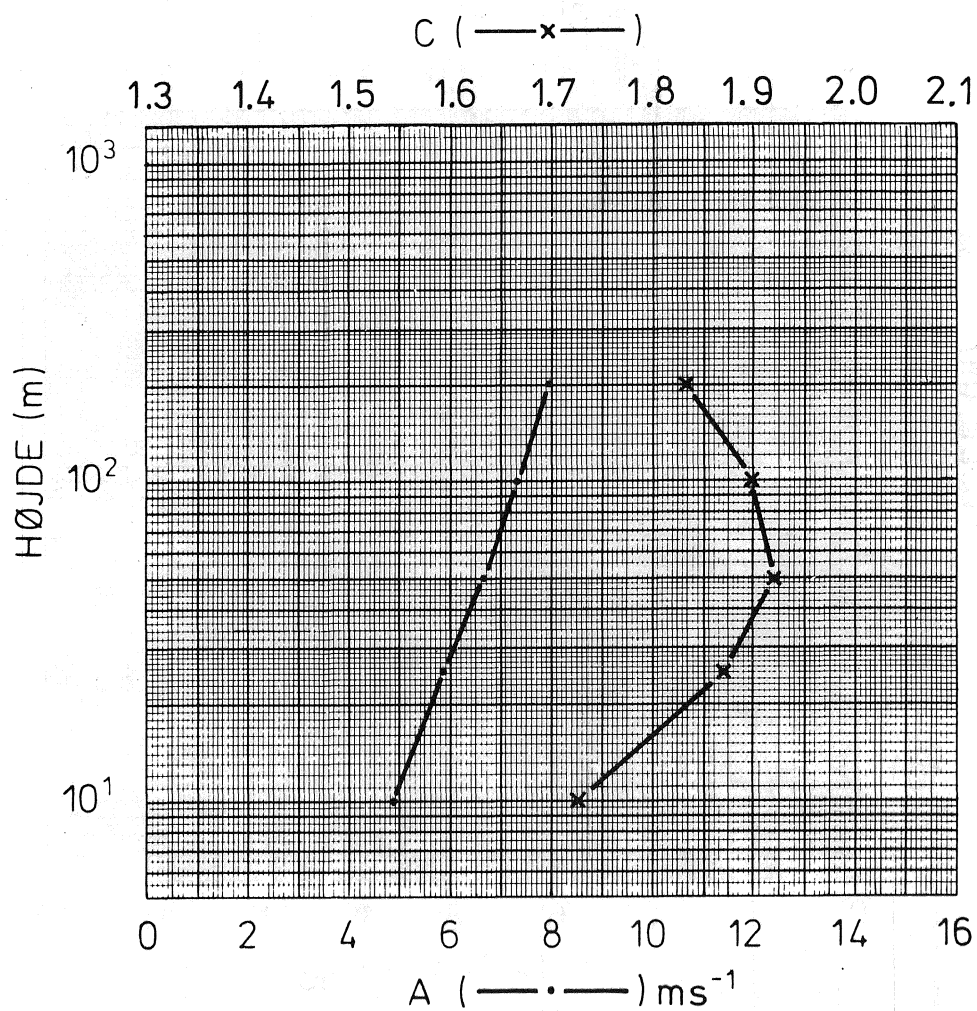
SEKTOR: N
RUHEDSKLASSE: 3
HYPPIGHED f: 6.8



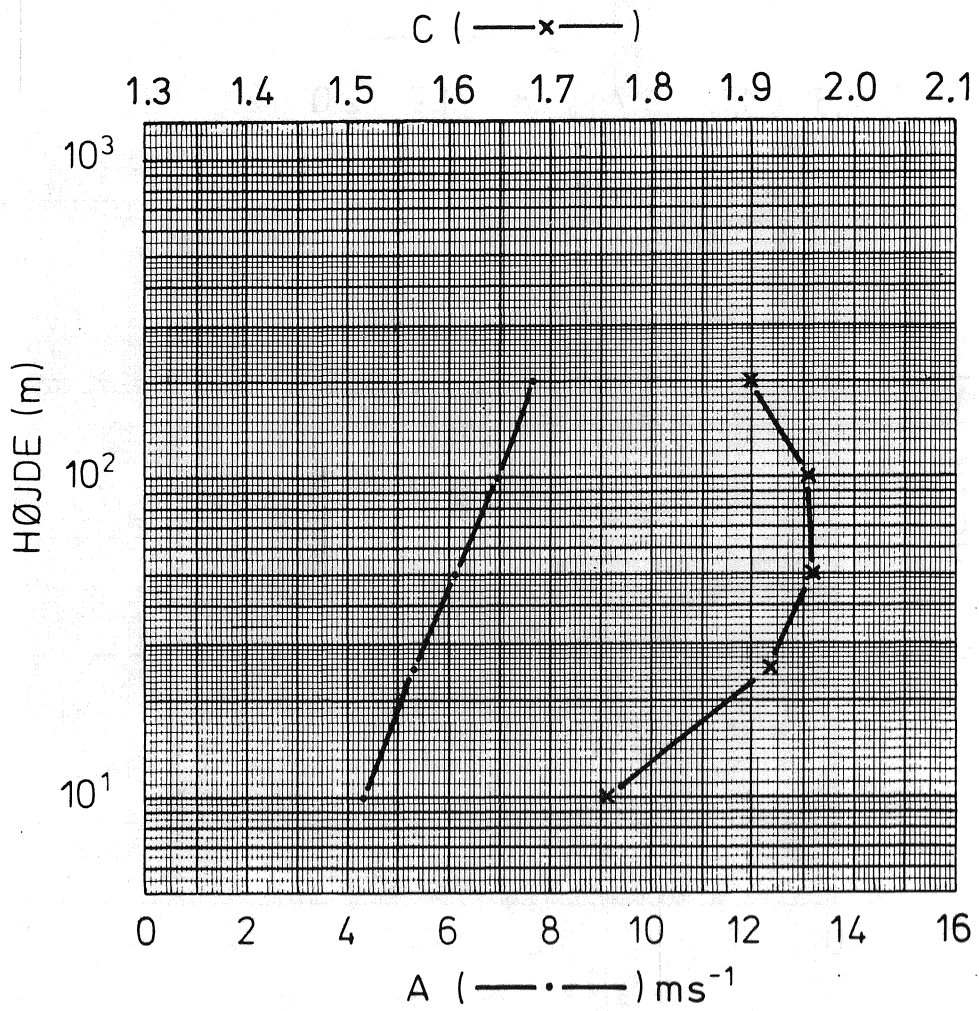
SEKTOR: NE
RUHEDSKLASSE: 0
HYPPIGHED f 8.7 %



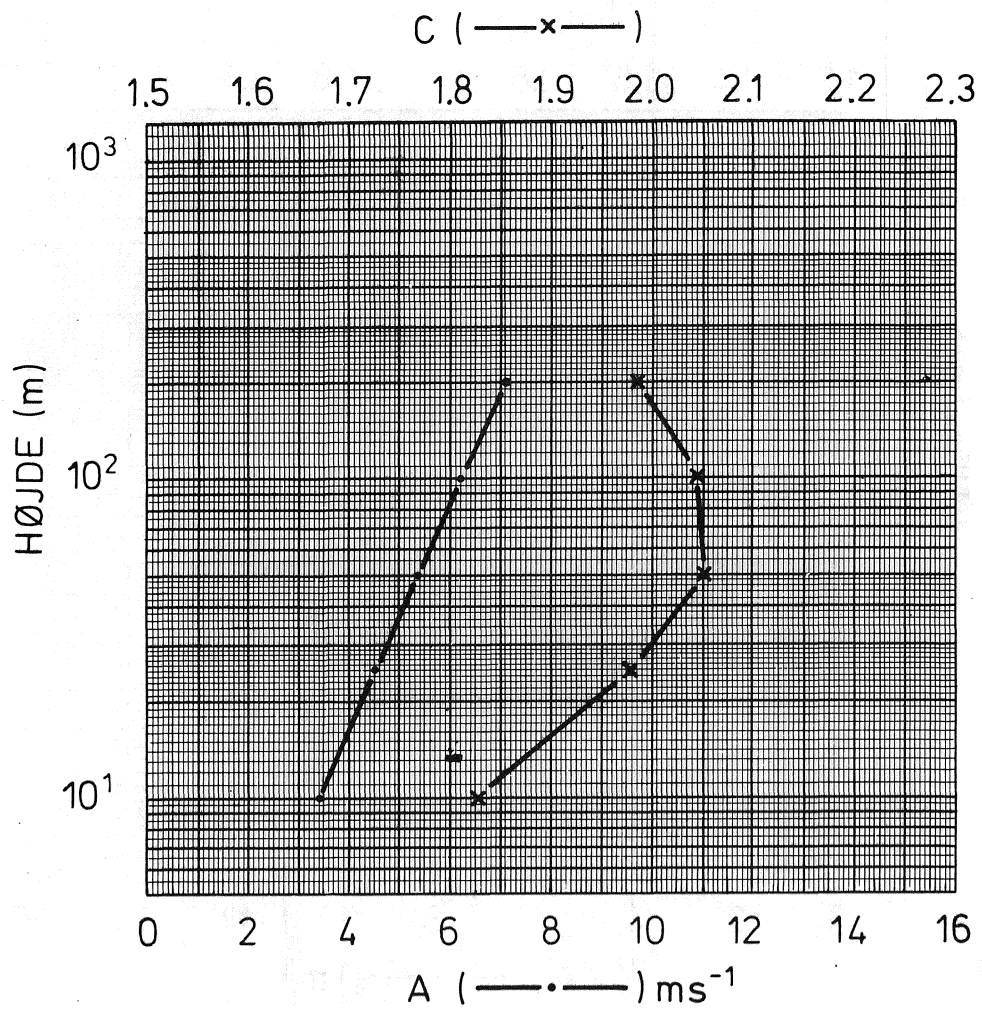
SEKTOR: NE
RUHEDSKLASSE: 1
HYPPIGHED f: 9.0 %



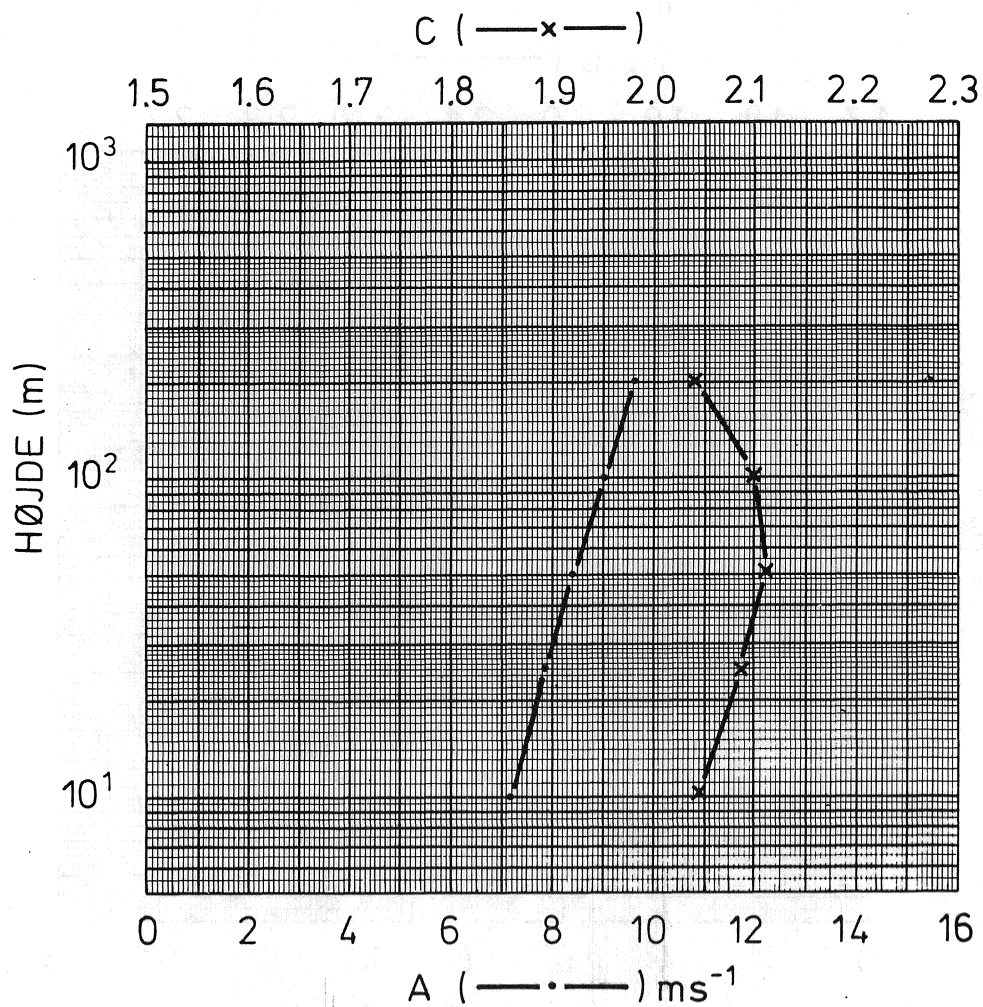
SEKTOR: NE
RUHEDSKLASSE: 2
HYPPIGHED f: 9.2



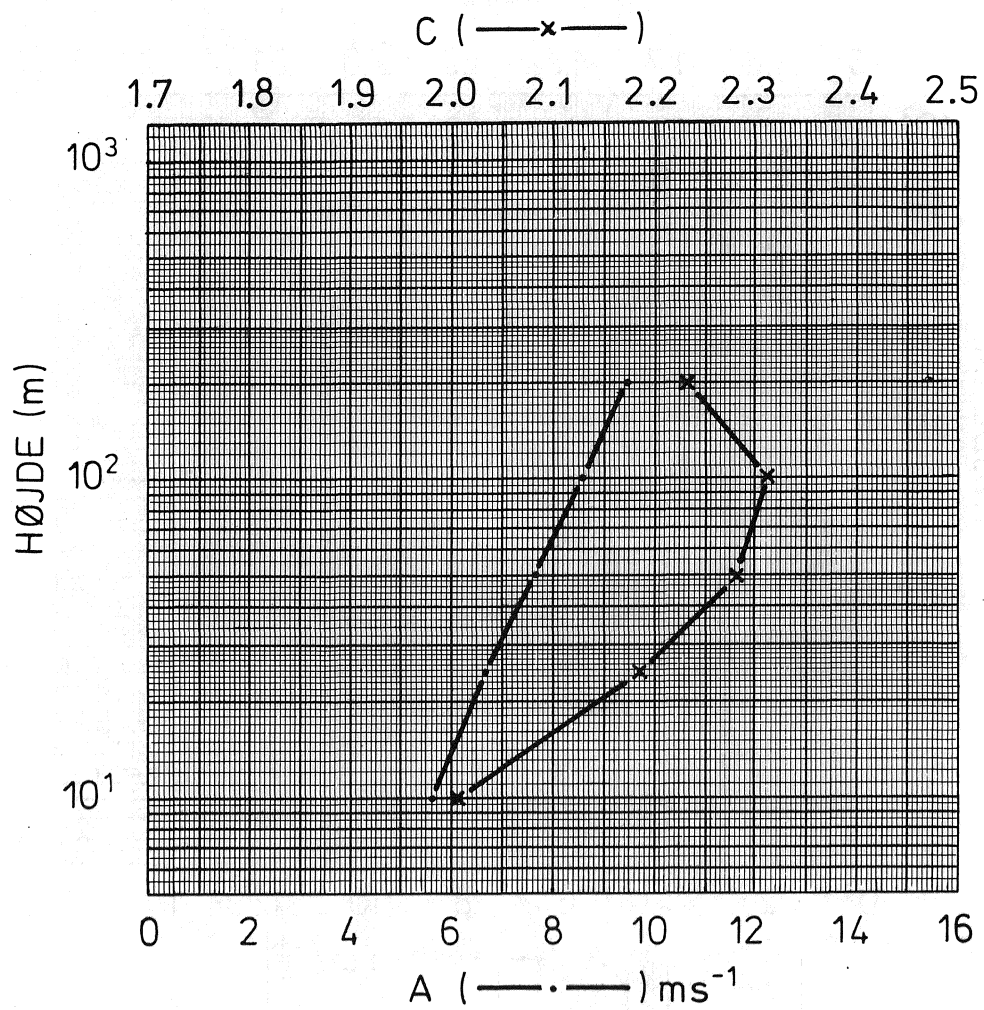
SEKTOR: NE
RUHEDSKLASSE: 3
HYPPIGHED f: 9.7 %



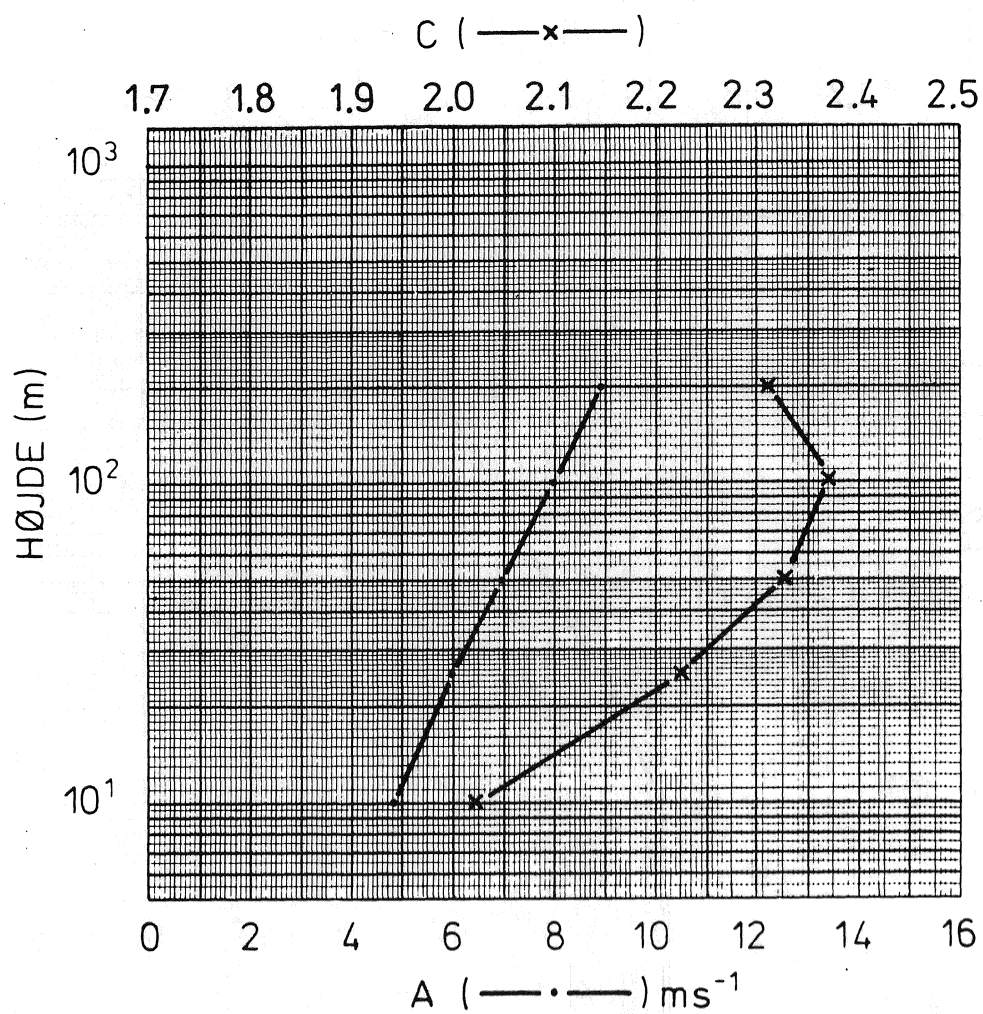
SEKTOR: E
RUHEDSKLASSE: 0
HYPPIGHED f 12.3 %



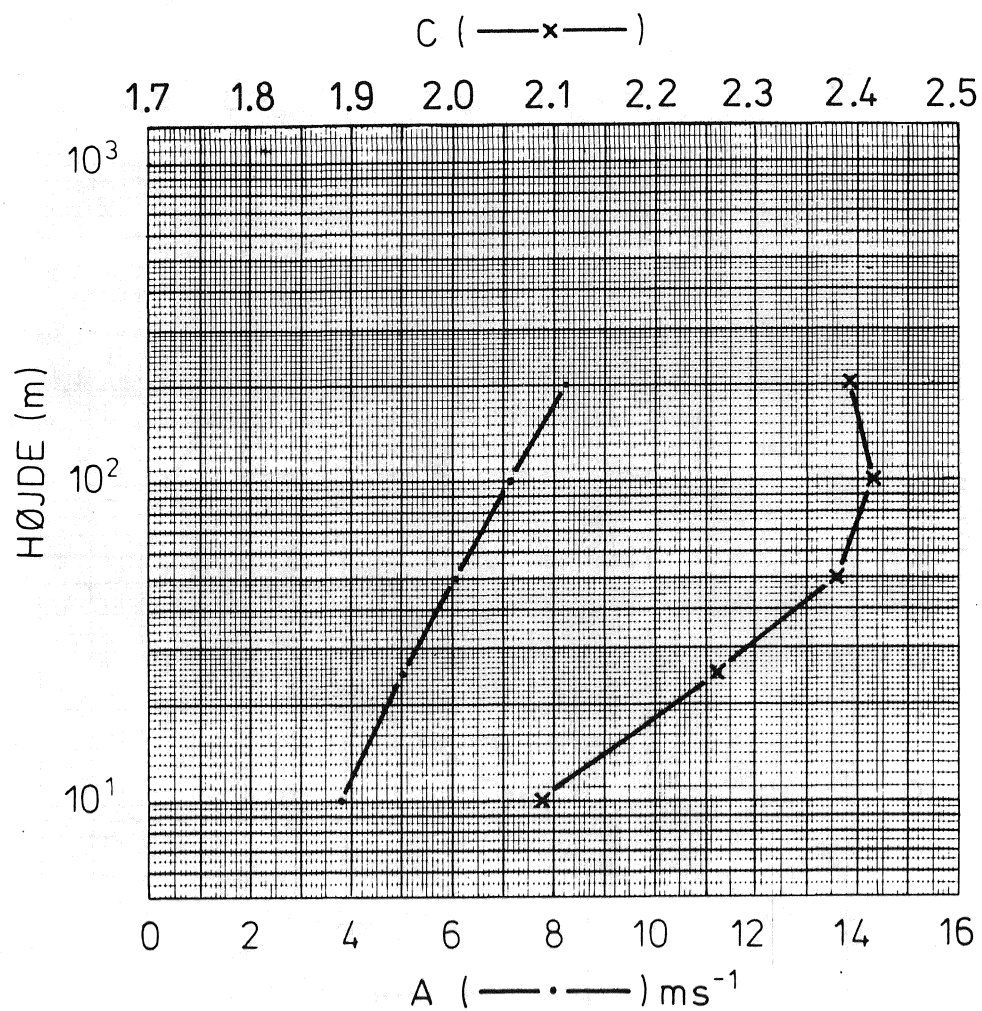
SEKTOR: E
RUHEDSKLASSE: 1
HYPPIGHED f: 12,5 %



SEKTOR: E
RUHEDSKLASSE: 2
HYPPIGHED f: 12.7 %

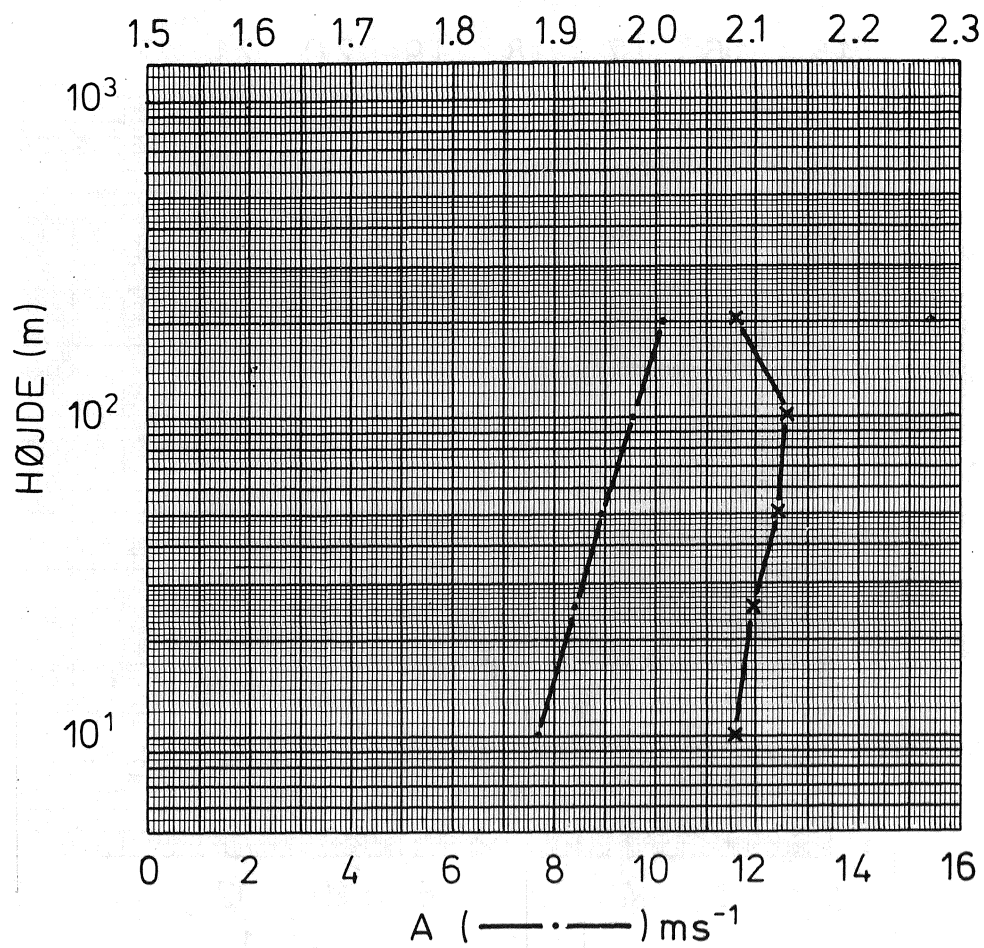


SEKTOR: E
RUHEDSKLASSE: 3
HYPPIGHED f: 12.7 %

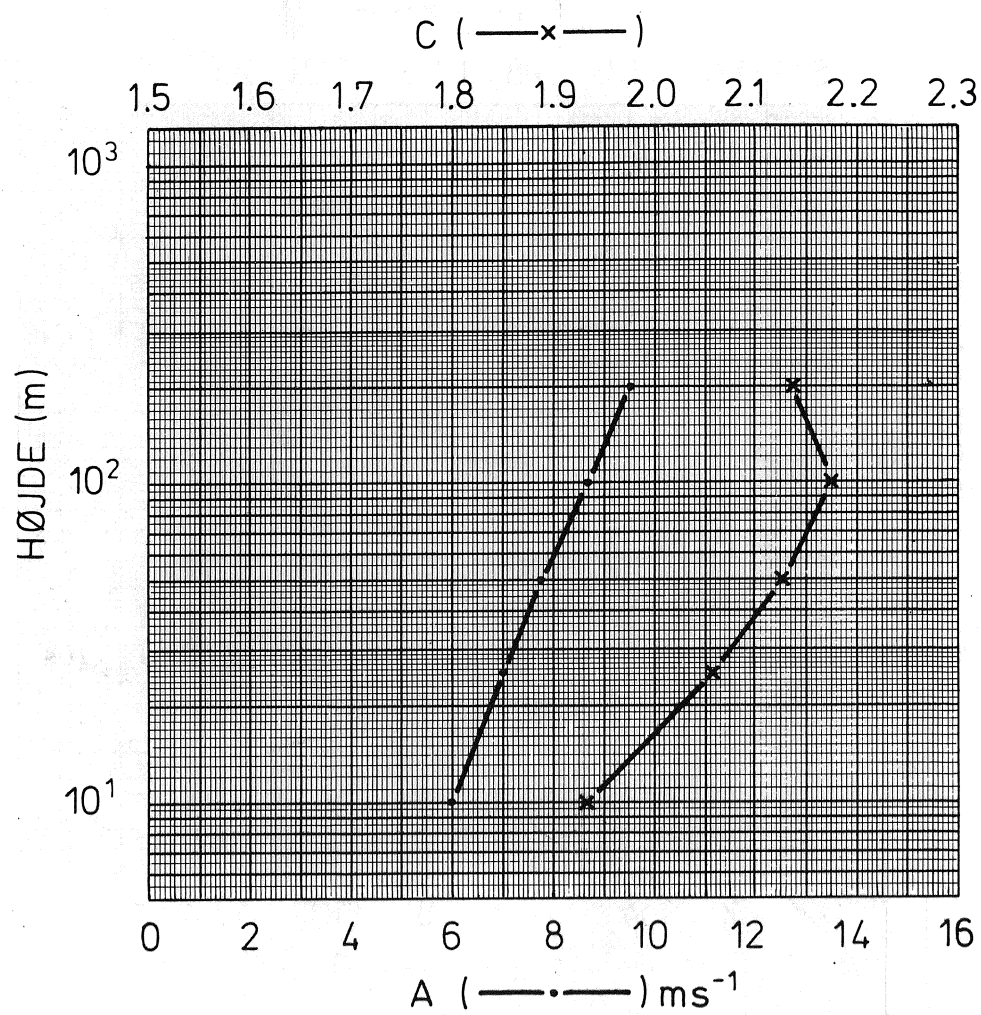


SEKTOR: SE
RUHEDSKLASSE: 0
HYPPIGHED f 12.3 %

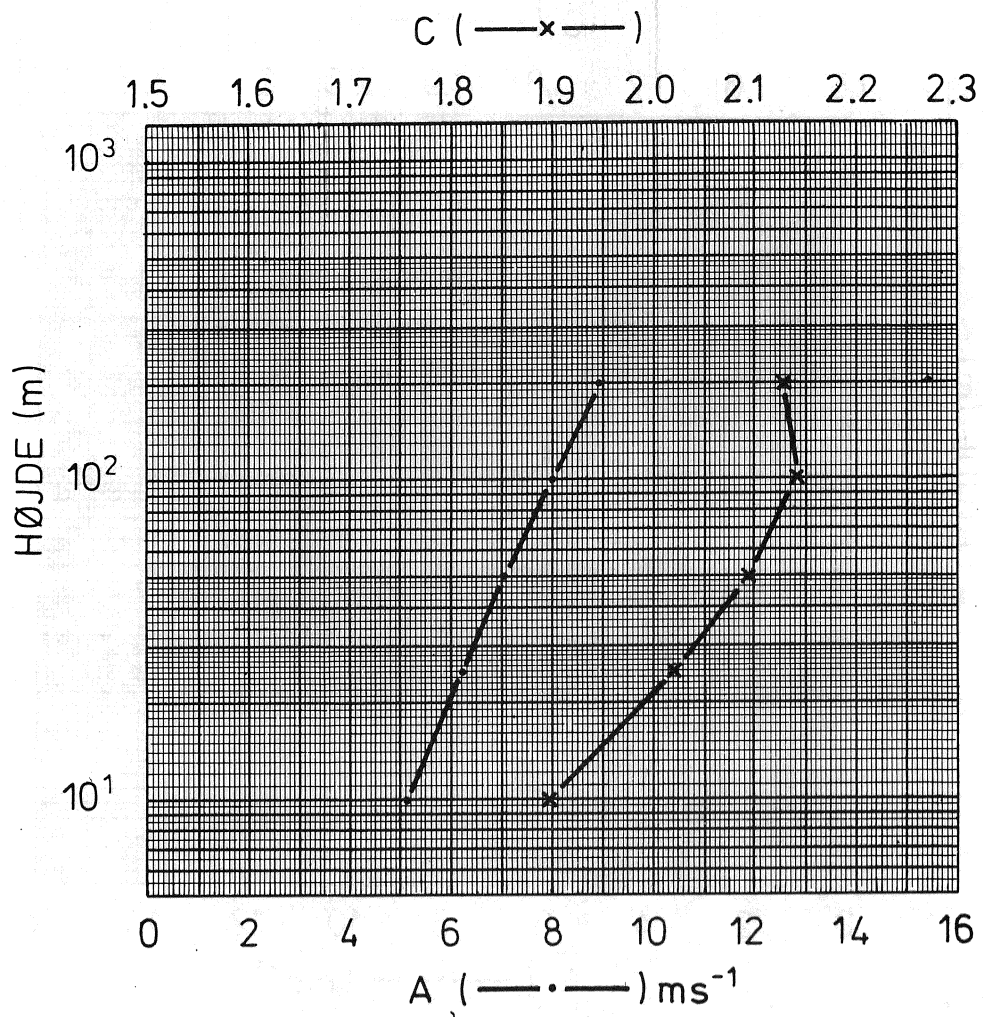
C (—x—)



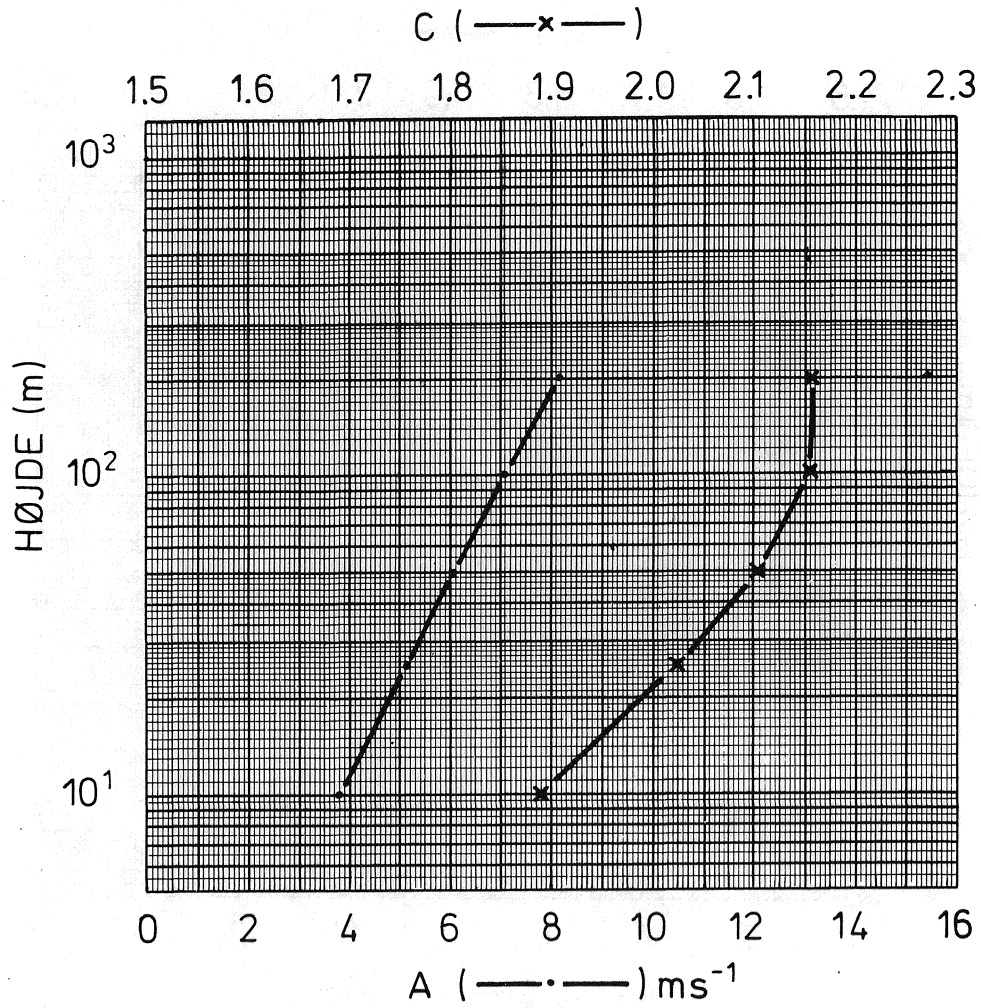
SEKTOR: SE
RUHEDSKLASSE: 1
HYPPIGHED f: 12.2 %



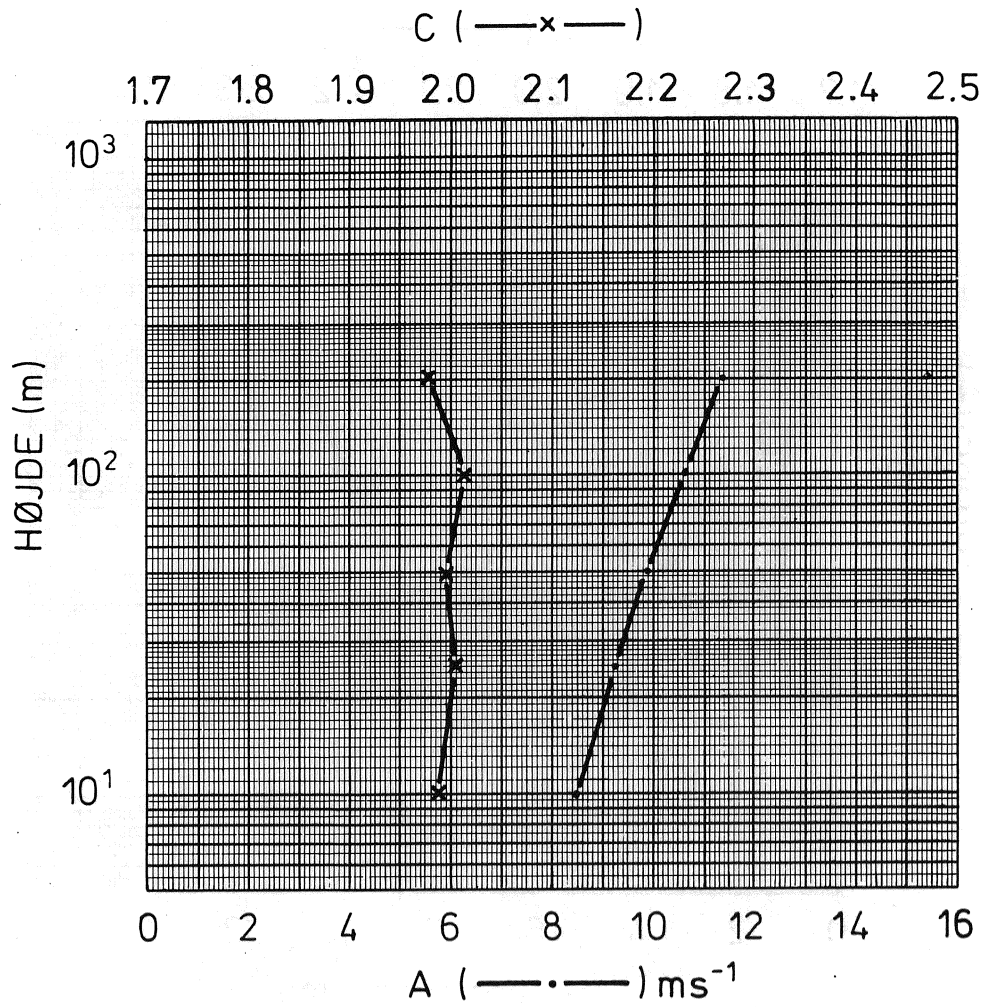
SEKTOR: SE
RUHEDSKLASSE: 2
HYPPIGHED f: 12.2 %



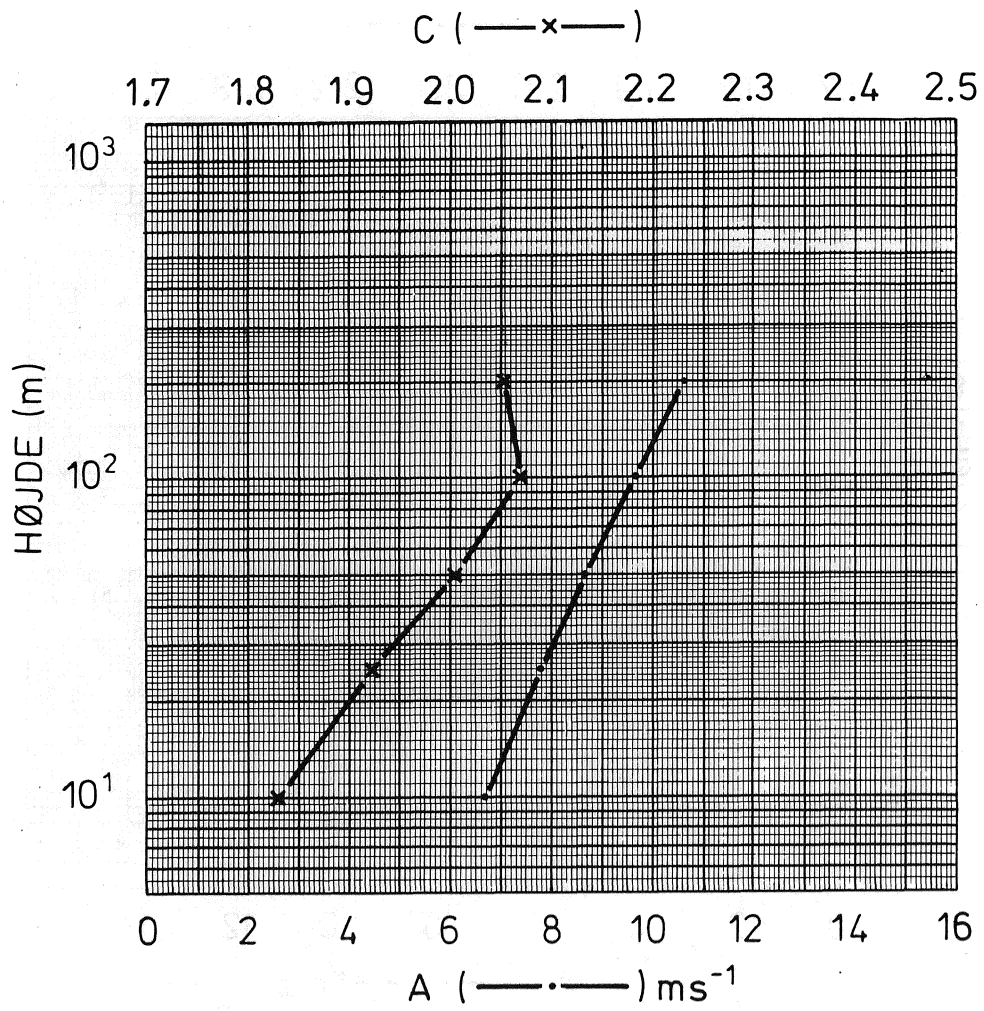
SEKTOR: SE
RUHEDSKLASSE: 3
HYPPIGHED f 12.2 %



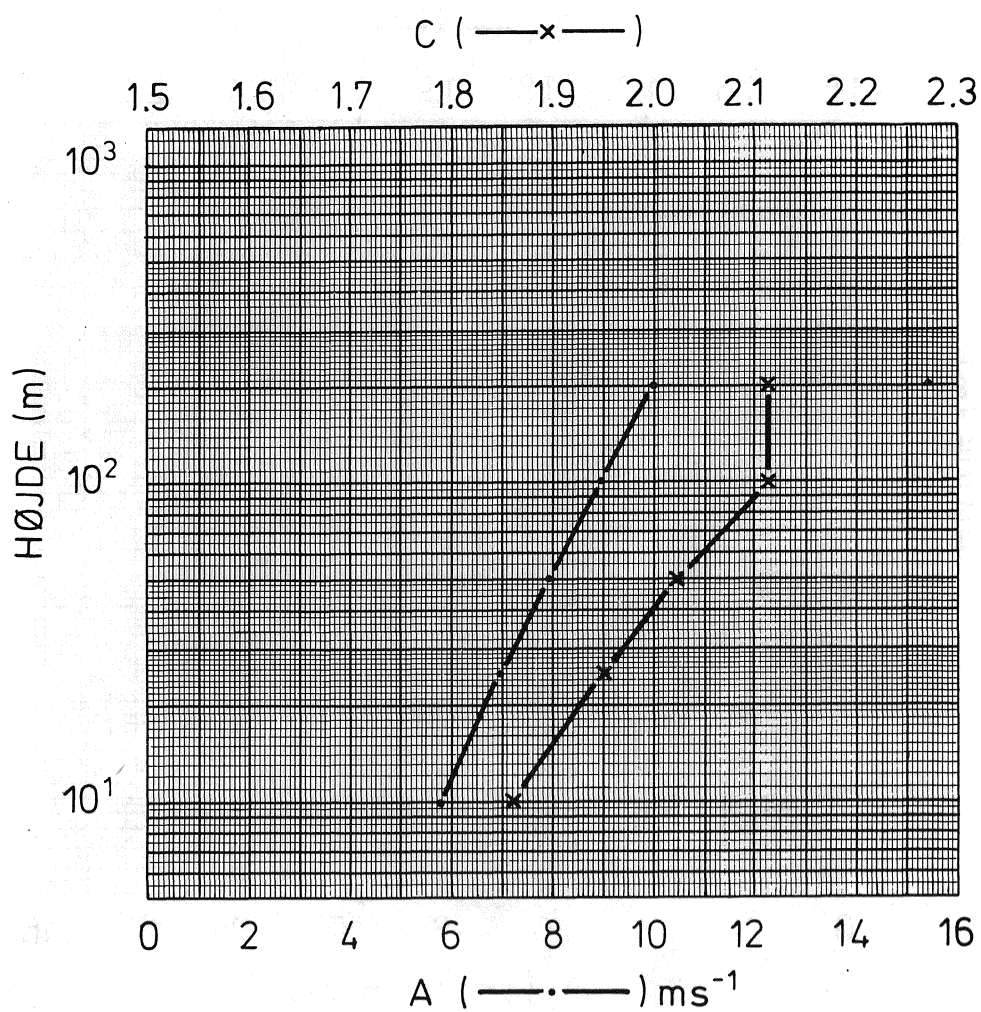
SEKTOR: S
RUHEDSKLASSE: 0
HYPPIGHED f 14.6 %



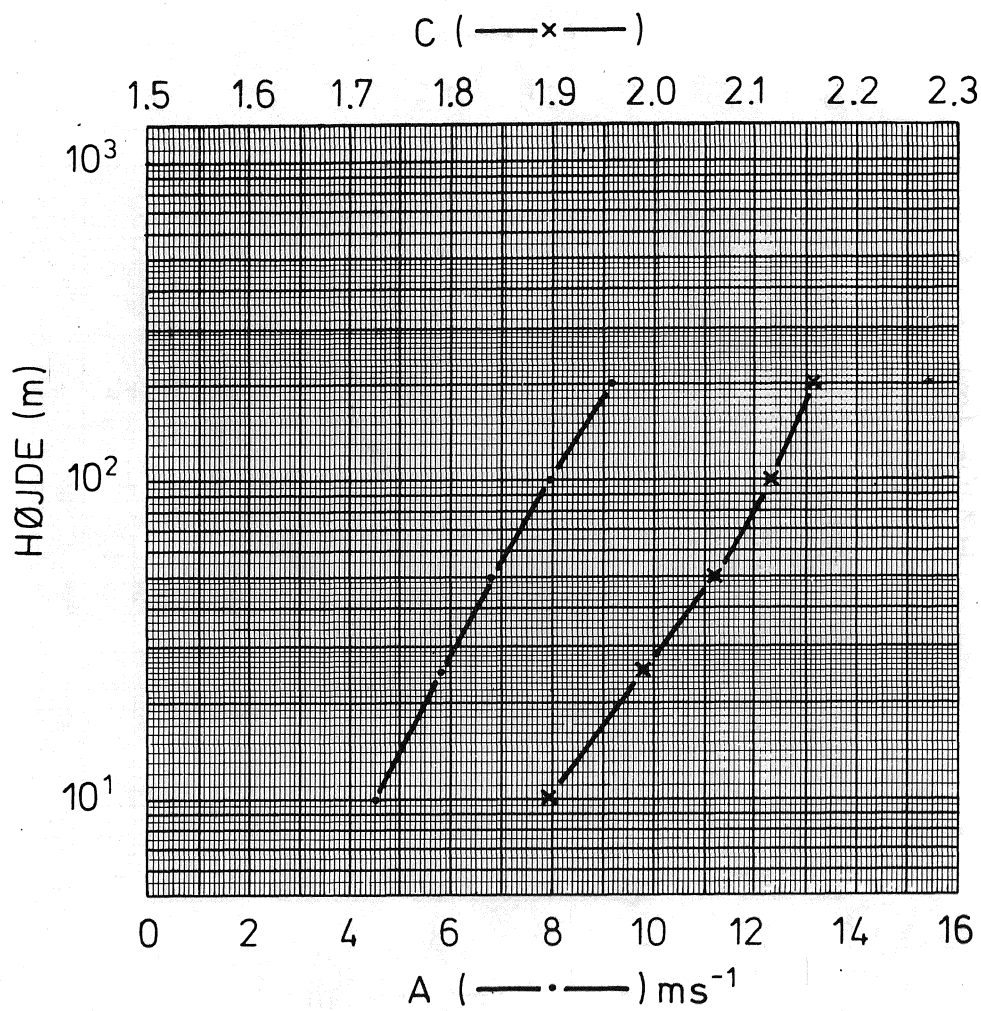
SEKTOR: S
RUHEDSKLASSE: 1
HYPPIGHED f: 15.3 %



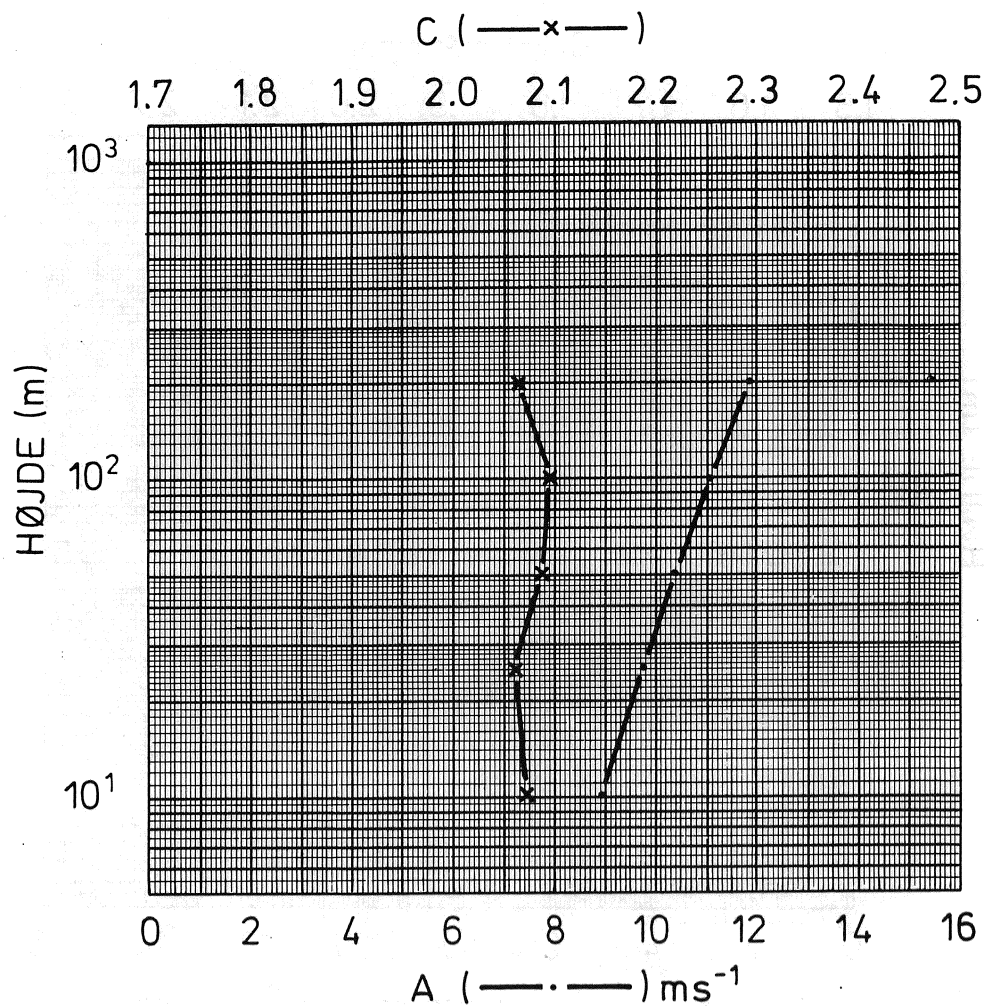
SEKTOR: S
RUHEDSKLASSE: 2
HYPPIGHED f: 15.7 %



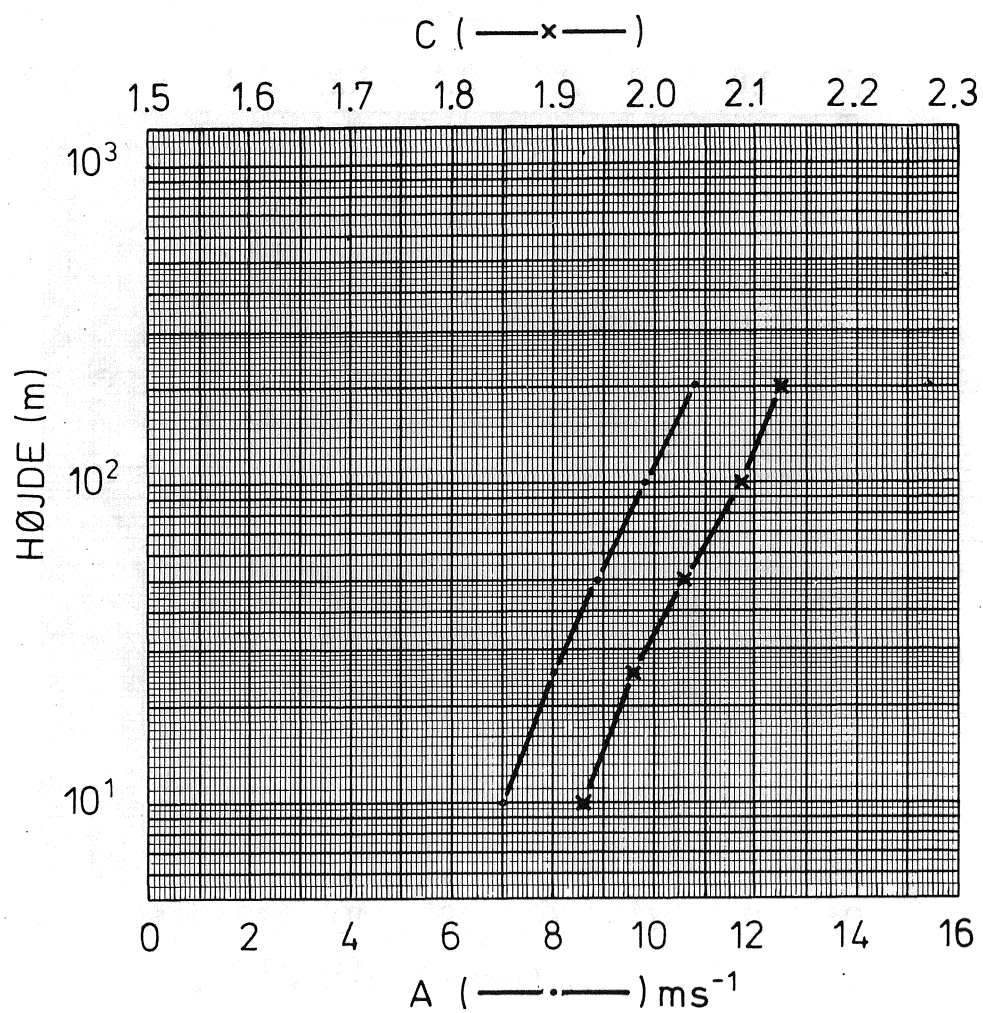
SEKTOR: S
RUHEDSKLASSE: 3
HYPPIGHED f: 16.1%



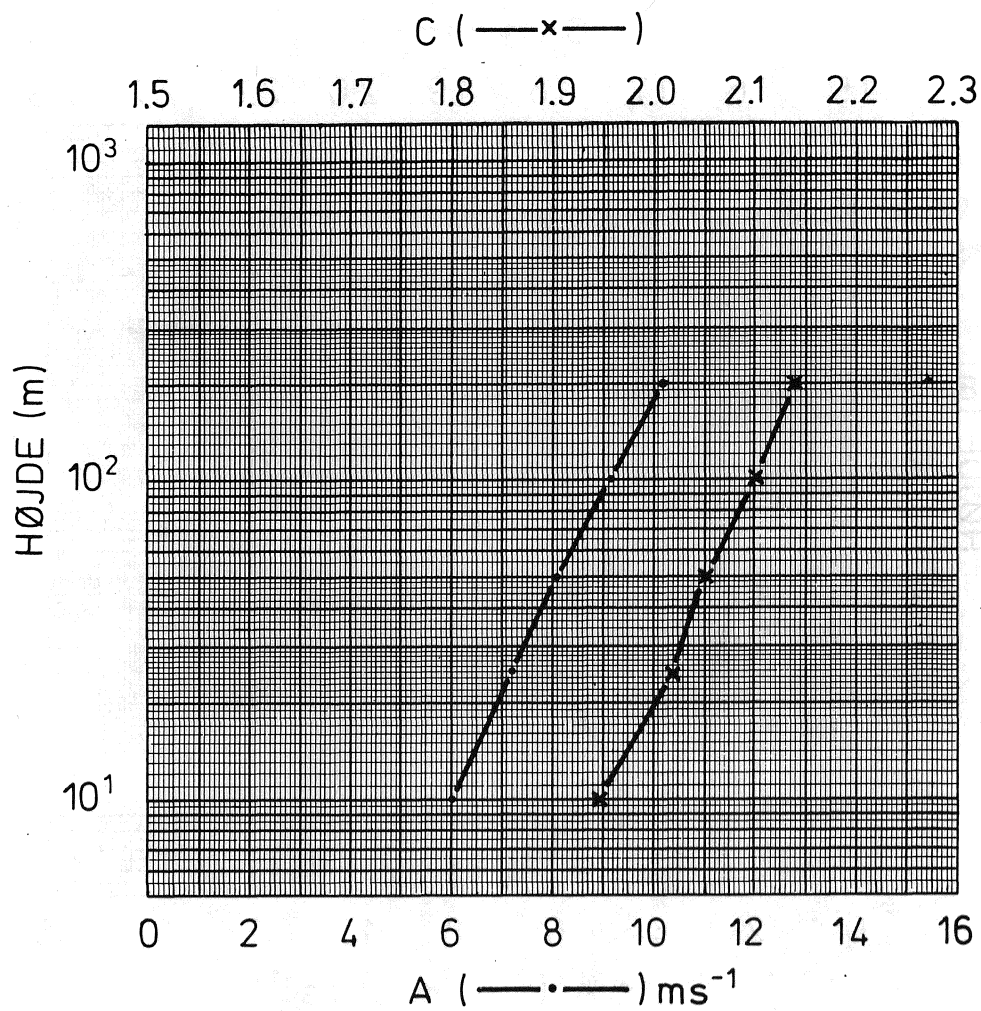
SEKTOR: SW
RUHEDSKLASSE: 0
HYPPIGHED f 17.2 %



SEKTOR: SW
RUHEDSKLASSE: 1
HYPPIGHED f: 17.7%



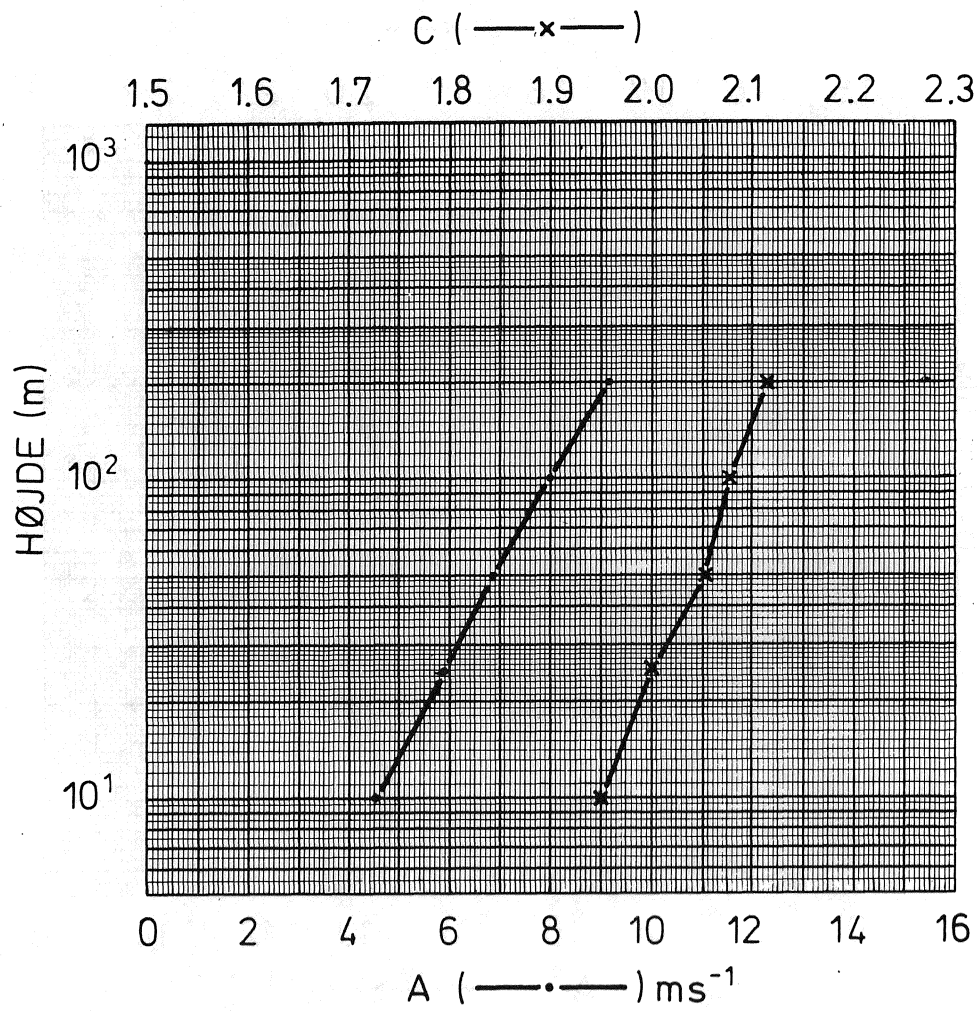
SEKTOR: SW
RUHEDSKLASSE: 2
HYPPIGHED f: 18.0%



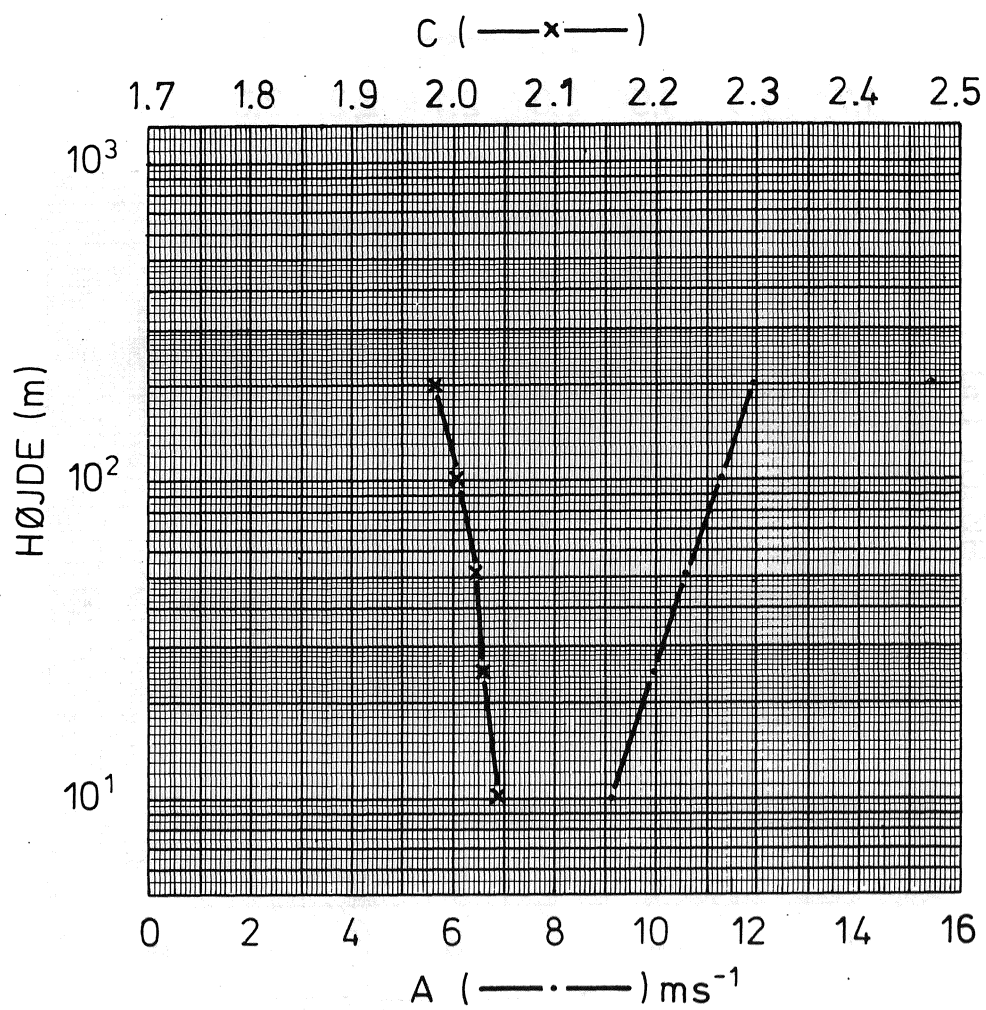
SEKTOR: SW

RUHEDSKLASSE: 3

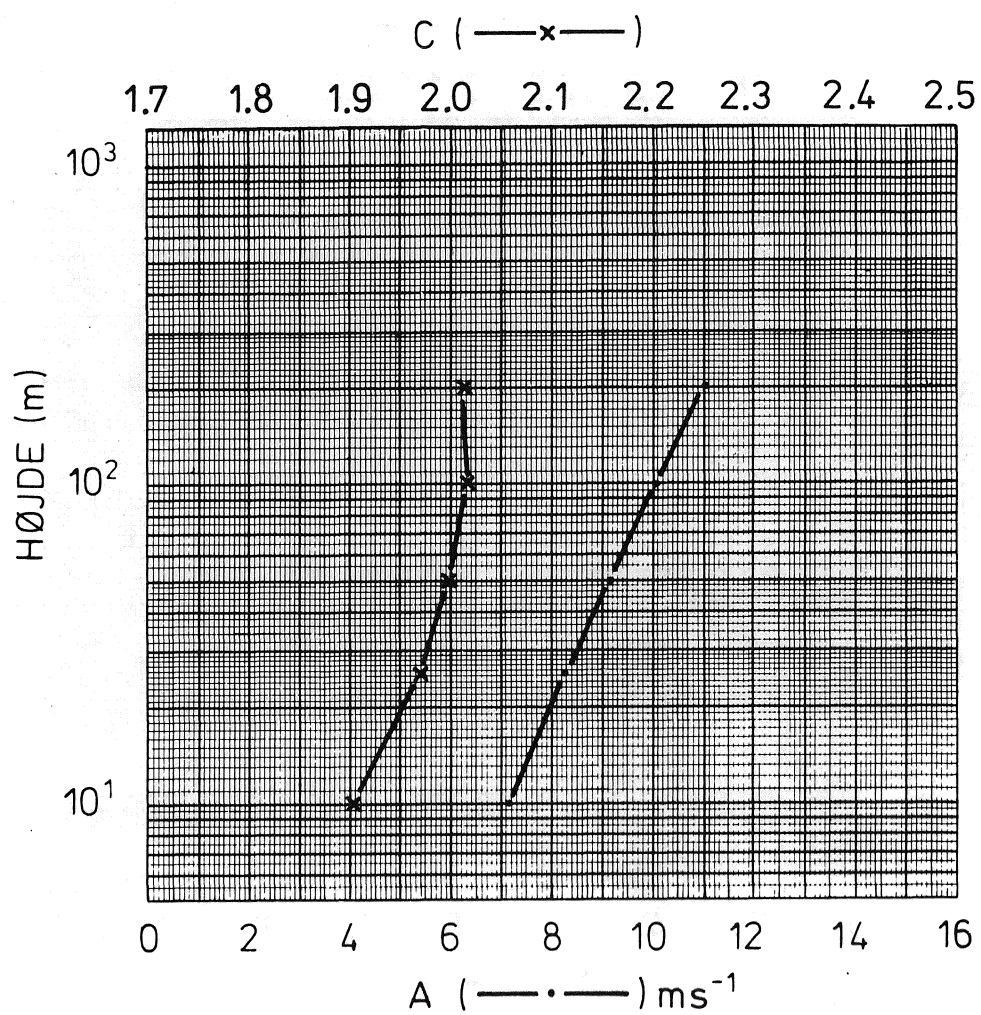
HYPPIGHED f 18.8 %



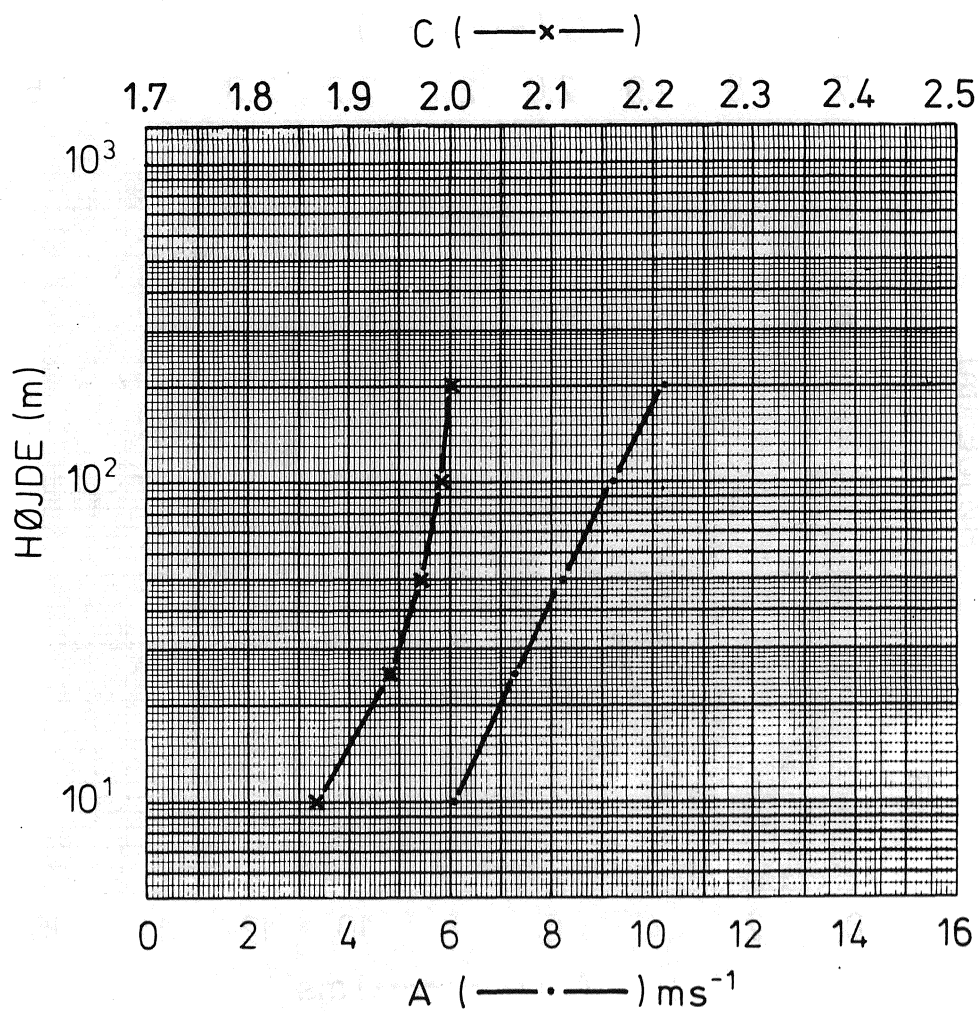
SEKTOR: W
RUHEDSKLASSE: 0
HYPPIGHED f 19.8 %



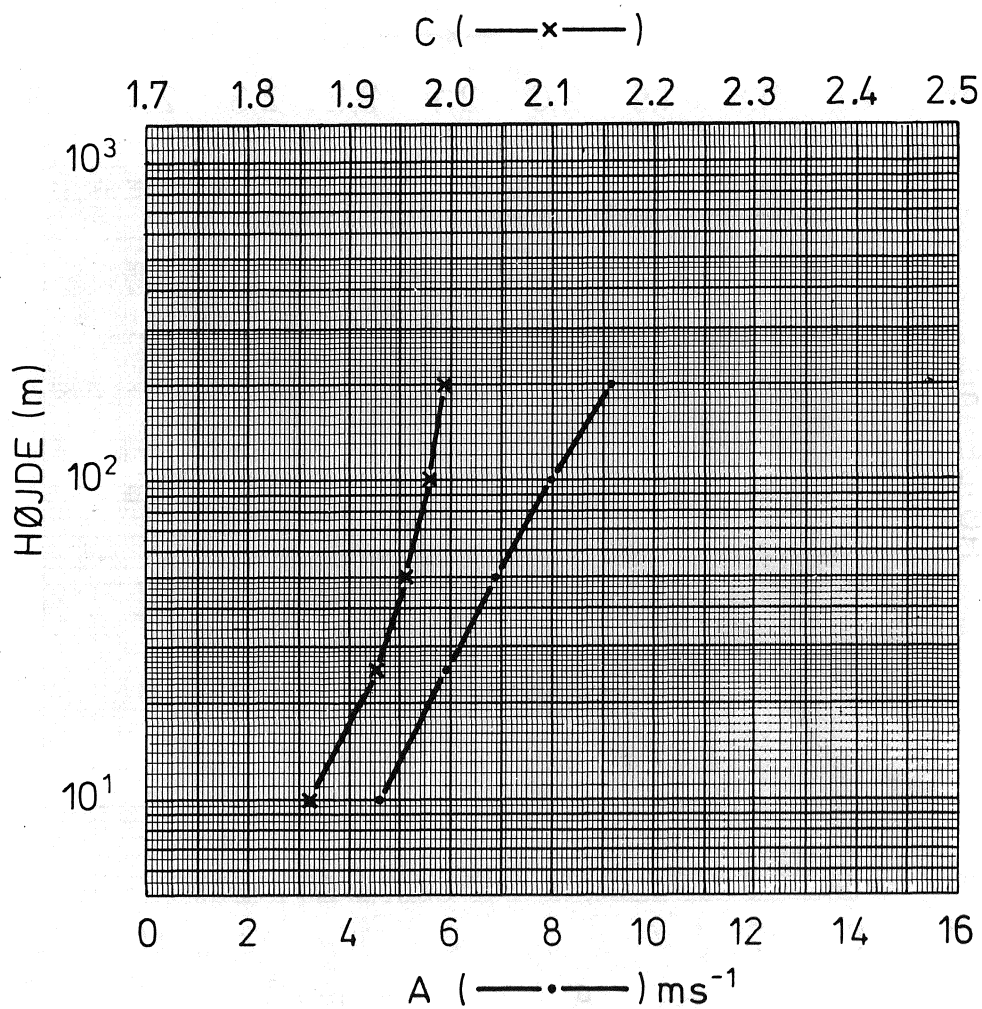
SEKTOR: W
RUHEDSKLASSE: 1
HYPPIGHED f: 18.8%



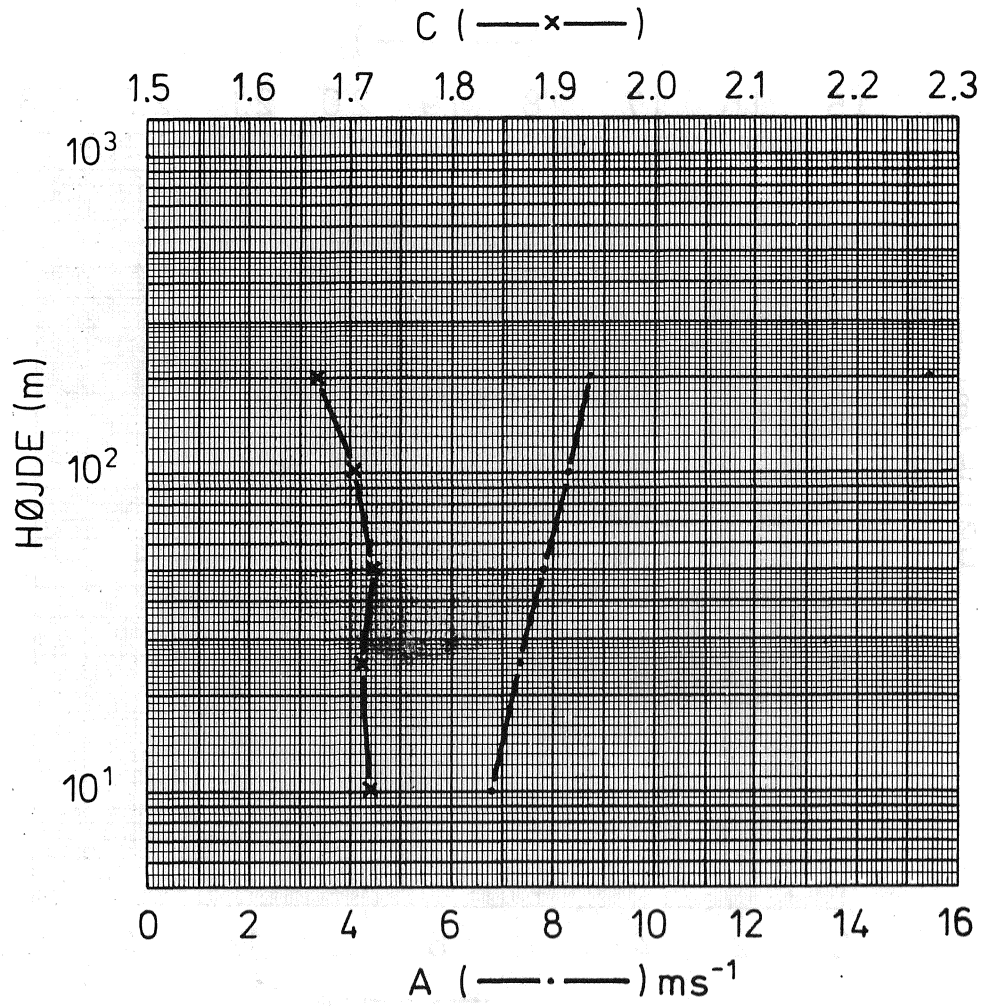
SEKTOR: W
RUHEDSKLASSE: 2
HYPPIGHED f: 18.1%



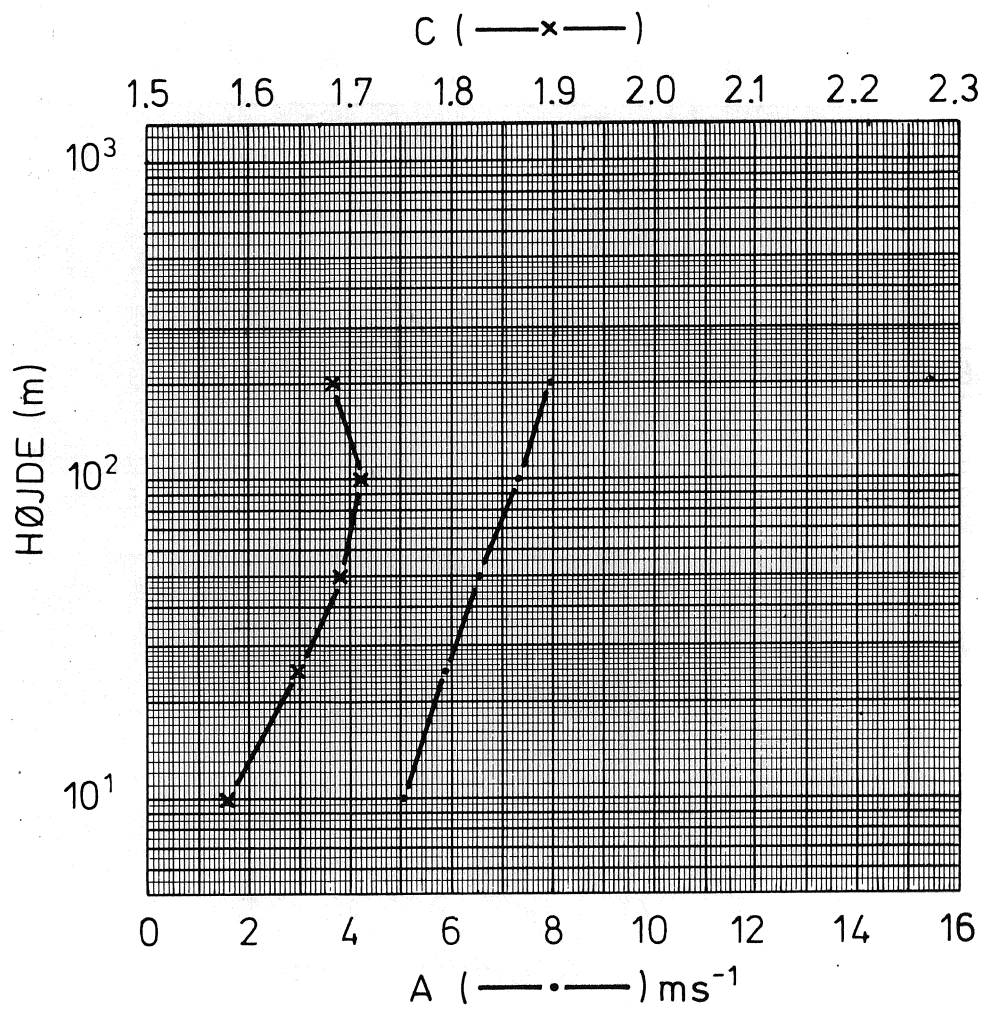
SEKTOR: W
RUHEDSKLASSE: 3
HYPPIGHED f: 16.6 %



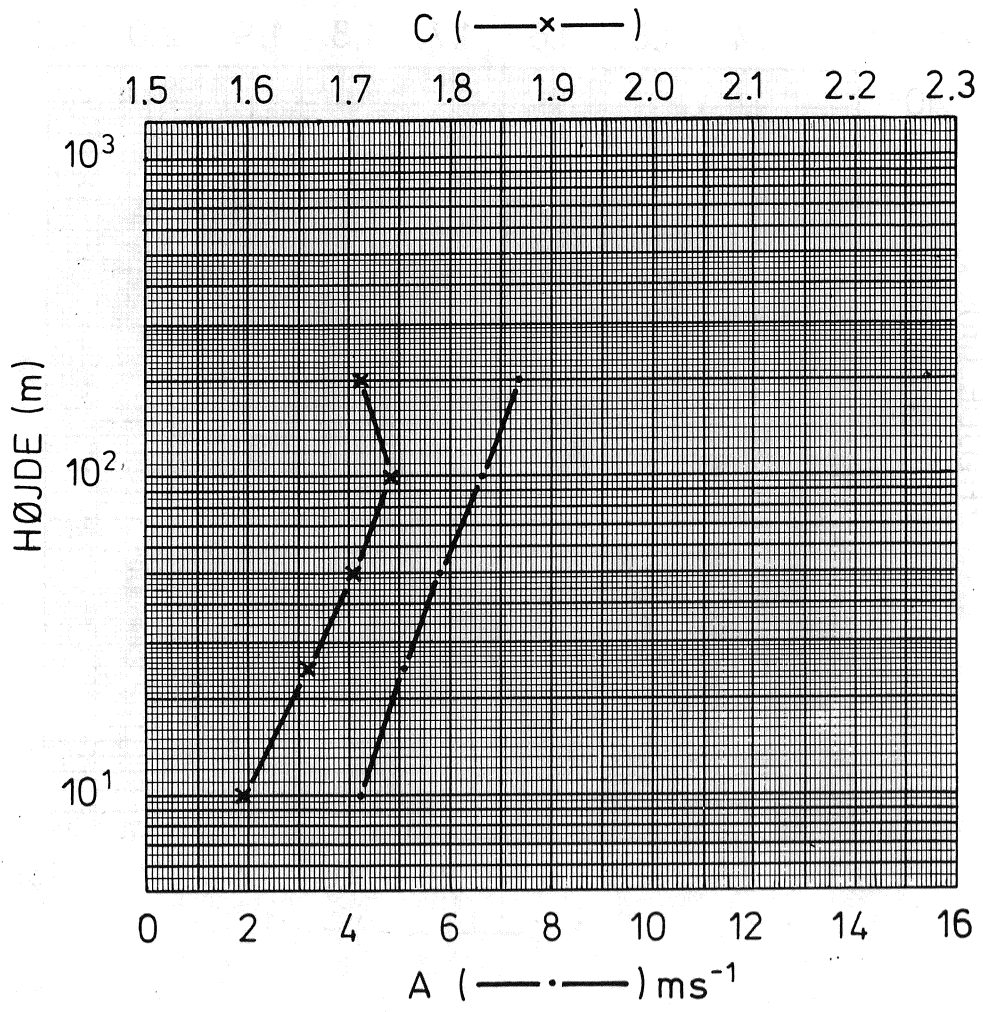
SEKTOR: NW
RUHEDSKLASSE: 0
HYPPIGHED f 8.7 %



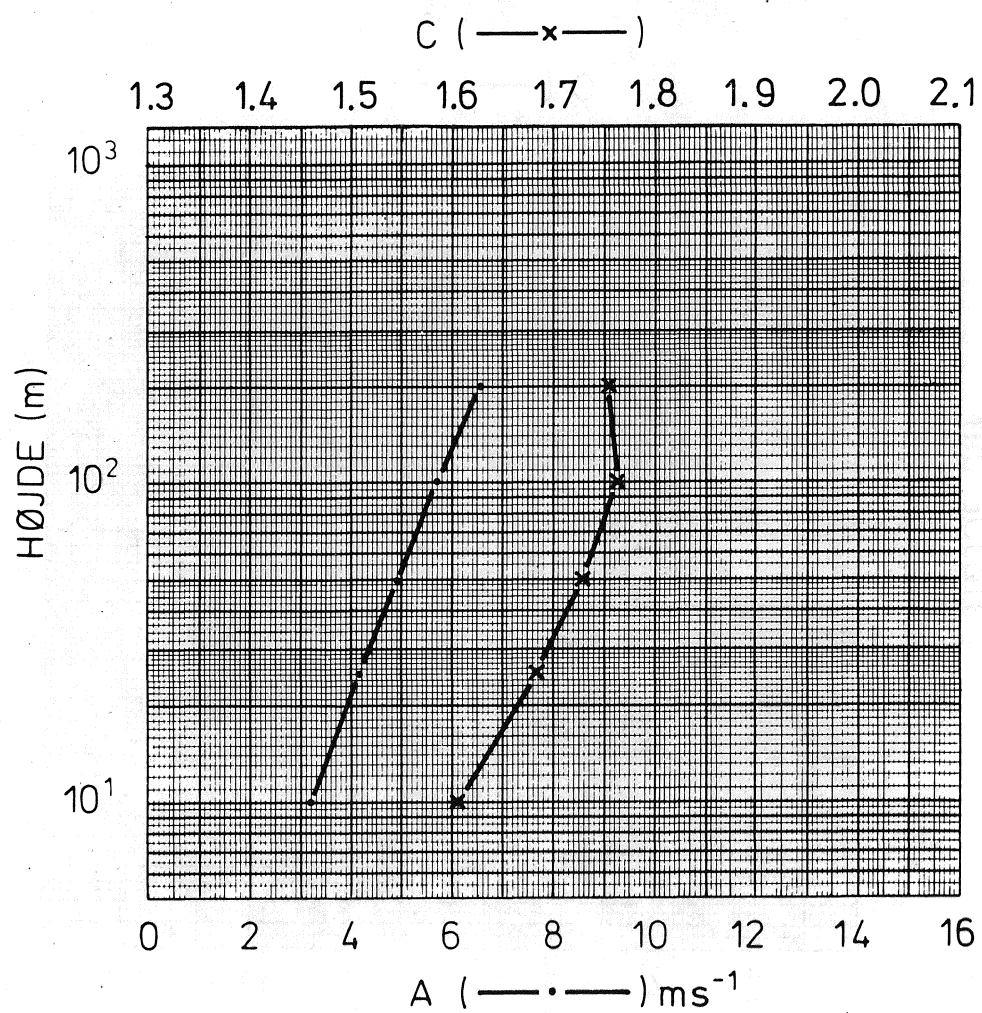
SEKTOR: NW
RUHEDSKLASSE: 1
HYPPIGHED f: 8.0 %



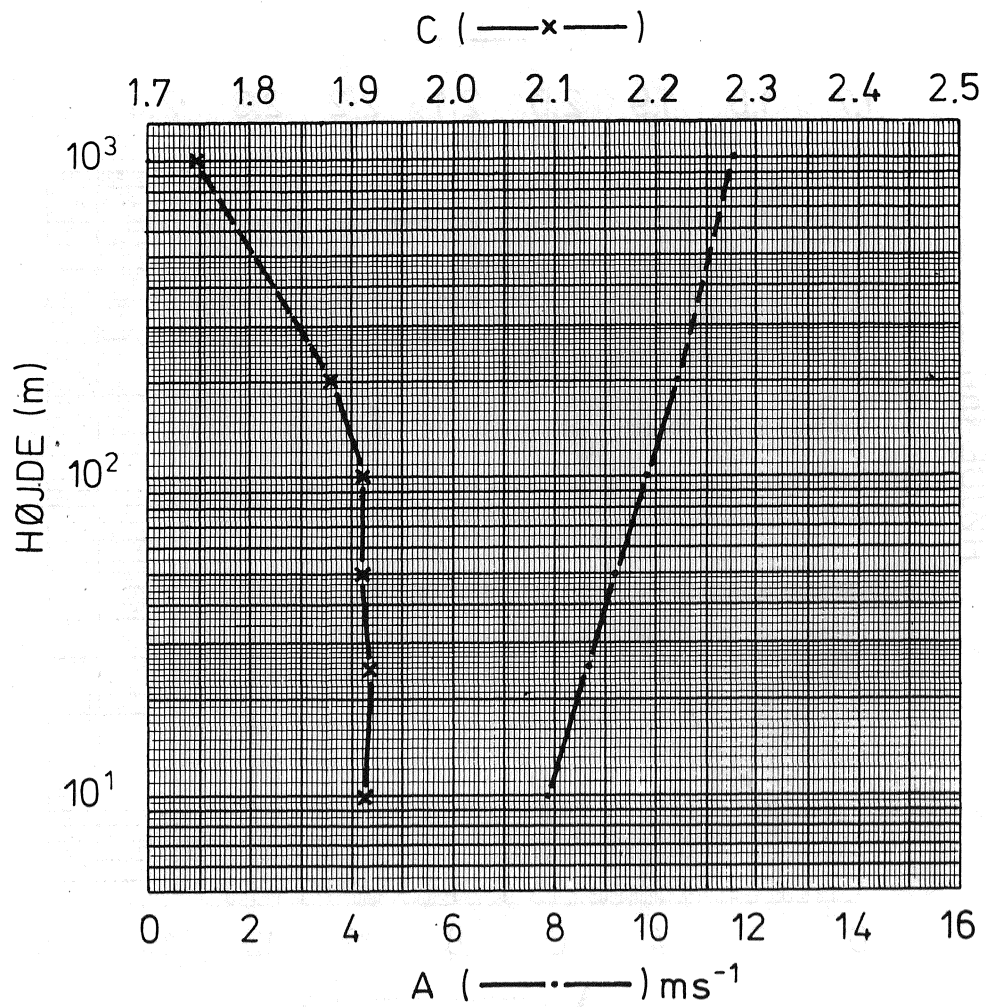
SEKTOR: NW
RUHEDSKLASSE: 2
HYPPIGHED f: 7.6%



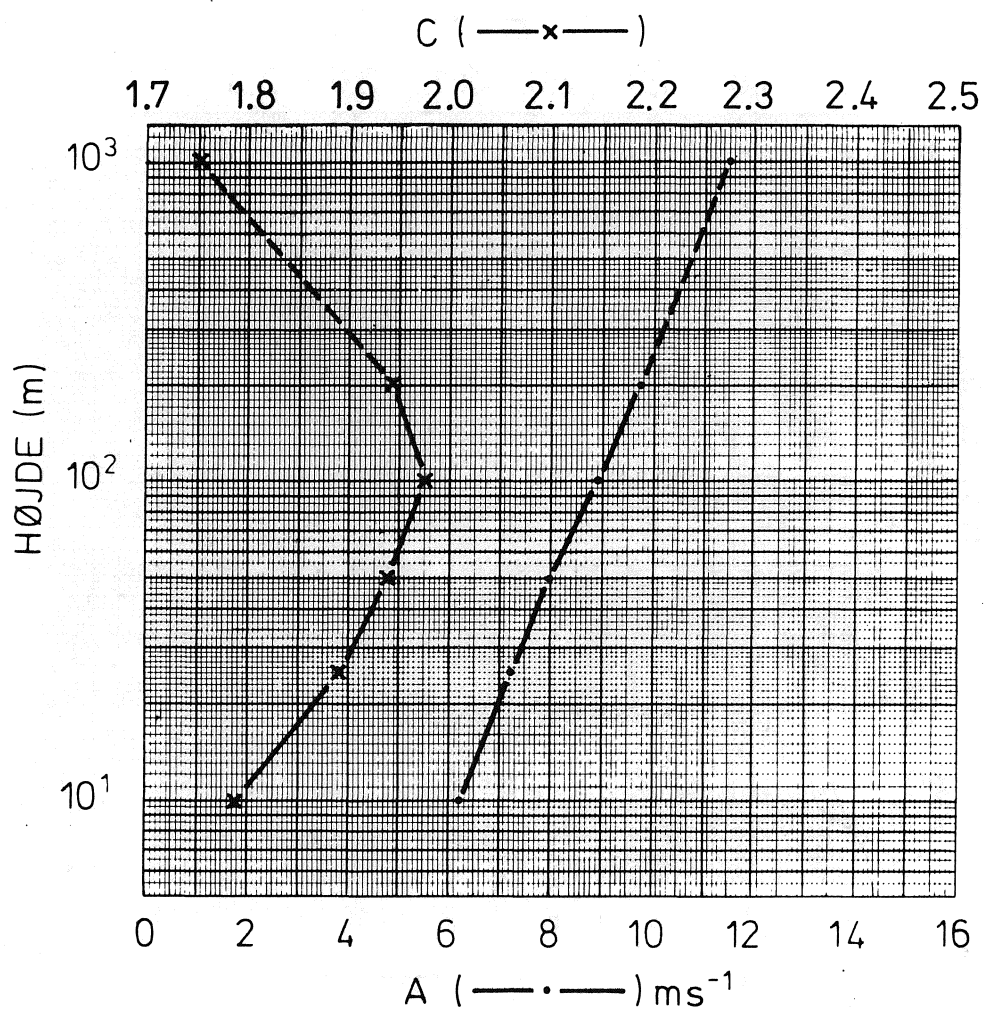
SEKTOR: NW
RUHEDSKLASSE: 3
HYPPIGHED f: 7.1 %



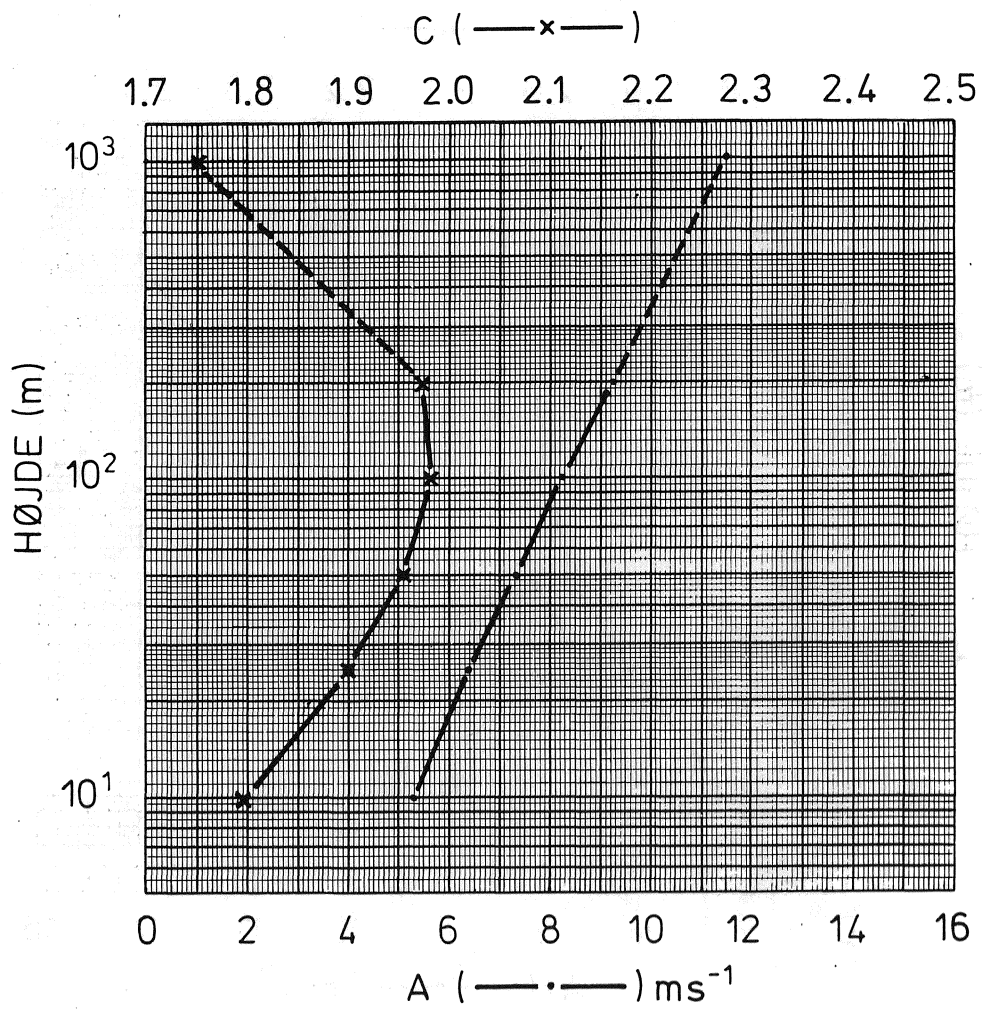
SEKTOR: ALLE
RUHEDSKLASSE: 0
HYPPIGHED f 100 %



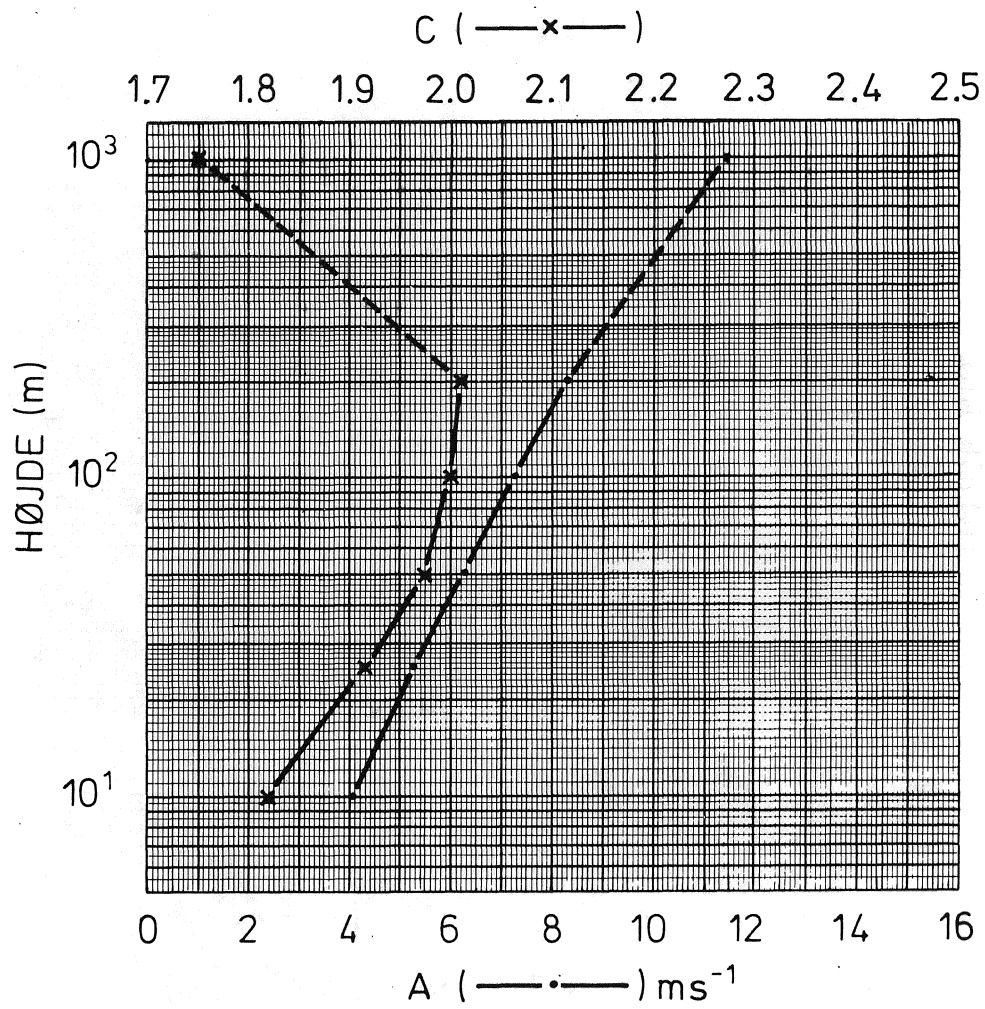
SEKTOR: ALLE
RUHEDSKLASSE: 1
HYPPIGHED f: 100 %



SEKTOR: ALLE
RUHEDSKLASSE: 2
HYPPIGHED f: 100 %



SEKTOR: ALLE
RUHEDSKLASSE: 3
HYPPIGHED f: 100 %



Tabel A1. Tabel til beregning af total effekttæthed i vinden ud fra Weibull-parametre A og C. Af-læs i tabellen $F_E(C)$ svarende til værdien af C ved at gå ind i rækken svarende til de to første cifre og søjlen svarende til sidste ciffer i C. Effekttætheden i enheden kWh/m²/år er så givet som:
 $E = A^3 F_E(C)$.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.0	32.347	31.166	30.057	29.016	28.036	27.113	26.242	25.420	24.644	23.910
1.1	23.214	22.555	21.931	21.337	20.774	20.238	19.728	19.242	18.779	18.338
1.2	17.916	17.514	17.129	16.761	16.409	16.072	15.749	15.439	15.142	14.856
1.3	14.582	14.319	14.066	13.822	13.588	13.362	13.145	12.935	12.733	12.538
1.4	12.350	12.169	11.993	11.824	11.660	11.501	11.348	11.200	11.056	10.917
1.5	10.782	10.652	10.525	10.402	10.283	10.167	10.055	9.946	9.840	9.738
1.6	9.638	9.541	9.446	9.354	9.265	9.178	9.093	9.011	8.931	8.852
1.7	8.776	8.702	8.630	8.559	8.490	8.423	8.358	8.294	8.232	8.171
1.8	8.111	8.053	7.997	7.941	7.887	7.834	7.783	7.732	7.683	7.634
1.9	7.587	7.541	7.496	7.451	7.408	7.366	7.324	7.284	7.244	7.205
2.0	7.167	7.129	7.093	7.057	7.021	6.987	6.953	6.920	6.887	6.855
2.1	6.824	6.793	6.763	6.734	6.705	6.676	6.648	6.621	6.594	6.568
2.2	6.542	6.516	6.491	6.467	6.443	6.419	6.396	6.373	6.350	6.328
2.3	6.306	6.285	6.264	6.243	6.223	6.203	6.183	6.164	6.145	6.126
2.4	6.108	6.090	6.072	6.055	6.038	6.021	6.004	5.988	5.971	5.956
2.5	5.940	5.925	5.909	5.894	5.880	5.865	5.851	5.837	5.823	5.810
2.6	5.796	5.783	5.770	5.757	5.744	5.732	5.720	5.708	5.696	5.684
2.7	5.672	5.661	5.650	5.639	5.628	5.617	5.606	5.596	5.586	5.575
2.8	5.565	5.555	5.546	5.536	5.527	5.517	5.508	5.499	5.490	5.481
2.9	5.472	5.464	5.455	5.447	5.439	5.430	5.422	5.414	5.406	5.399
3.0	5.391	5.384	5.376	5.369	5.361	5.354	5.347	5.340	5.333	5.327

Tabel A2. Tabel til beregning af middelværdi ud fra Weibull-parametre A og C. Aflæs i tabellen $F_M(C)$ svarende til værdien af C ved at gå ind i rækken svarende til de to første cifre og søjlen svarende til sidste ciffer i C. Middelværdien er så givet som:

$$M = A F_M(C) \quad (\text{m/s})$$

(bemærk at $F_M(C)$ varierer meget lidt, og at værdien normalt kan sættes til 0,888).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.0	1.000	0.996	0.992	0.988	0.984	0.981	0.977	0.974	0.971	0.968
1.1	0.965	0.962	0.959	0.957	0.954	0.952	0.949	0.947	0.945	0.943
1.2	0.941	0.939	0.937	0.935	0.933	0.931	0.930	0.928	0.927	0.925
1.3	0.924	0.922	0.921	0.919	0.918	0.917	0.916	0.915	0.914	0.912
1.4	0.911	0.910	0.909	0.909	0.908	0.907	0.906	0.905	0.904	0.903
1.5	0.903	0.902	0.901	0.901	0.900	0.899	0.899	0.898	0.898	0.897
1.6	0.897	0.896	0.896	0.895	0.895	0.894	0.894	0.893	0.893	0.893
1.7	0.892	0.892	0.892	0.891	0.891	0.891	0.890	0.890	0.890	0.890
1.8	0.889	0.889	0.889	0.889	0.888	0.888	0.888	0.888	0.888	0.886
1.9	0.887	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886
2.0	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886
2.1	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886
2.2	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886
2.3	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886
2.4	0.886	0.887	0.887	0.887	0.887	0.887	0.887	0.887	0.887	0.887
2.5	0.887	0.887	0.887	0.888	0.888	0.888	0.888	0.888	0.888	0.888
2.6	0.888	0.888	0.888	0.889	0.889	0.889	0.889	0.889	0.889	0.889
2.7	0.889	0.889	0.890	0.890	0.890	0.890	0.890	0.890	0.890	0.890
2.8	0.890	0.891	0.891	0.891	0.891	0.891	0.891	0.891	0.891	0.892
2.9	0.892	0.892	0.892	0.892	0.892	0.892	0.892	0.893	0.893	0.893
3.0	0.893	0.893	0.893	0.893	0.894	0.894	0.894	0.894	0.894	0.894

Tabel A3. Tabel til beregning af varians ud fra givne Weibull-parametre A og C. $F_V(C)$ aflæses i tabellen og V^2 beregnes som:

$$V^2 = A^2 F_V(C) \quad (\text{m/s}^2)$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.0	2.000	1.964	1.930	1.897	1.865	1.835	1.806	1.779	1.752	1.727
1.1	1.702	1.679	1.657	1.635	1.614	1.594	1.575	1.556	1.538	1.521
1.2	1.505	1.489	1.473	1.458	1.444	1.430	1.416	1.403	1.390	1.378
1.3	1.366	1.355	1.344	1.333	1.322	1.312	1.302	1.293	1.284	1.275
1.4	1.266	1.257	1.249	1.241	1.233	1.226	1.218	1.211	1.204	1.197
1.5	1.191	1.184	1.178	1.172	1.166	1.160	1.154	1.149	1.143	1.138
1.6	1.133	1.128	1.123	1.118	1.114	1.109	1.105	1.100	1.096	1.092
1.7	1.088	1.084	1.080	1.076	1.073	1.069	1.066	1.062	1.059	1.055
1.8	1.052	1.049	1.046	1.043	1.040	1.037	1.034	1.031	1.029	1.026
1.9	1.023	1.021	1.018	1.016	1.013	1.011	1.009	1.007	1.004	1.002
2.0	1.000	0.998	0.996	0.994	0.992	0.990	0.988	0.986	0.984	0.983
2.1	0.981	0.979	0.977	0.976	0.974	0.972	0.971	0.969	0.968	0.966
2.2	0.965	0.963	0.962	0.961	0.959	0.958	0.957	0.955	0.954	0.953
2.3	0.952	0.951	0.949	0.948	0.947	0.946	0.945	0.944	0.943	0.942
2.4	0.941	0.940	0.939	0.938	0.937	0.936	0.935	0.934	0.933	0.932
2.5	0.931	0.931	0.930	0.929	0.928	0.927	0.927	0.926	0.925	0.924
2.6	0.924	0.923	0.922	0.921	0.921	0.920	0.919	0.919	0.918	0.918
2.7	0.917	0.916	0.916	0.915	0.915	0.914	0.914	0.913	0.912	0.912
2.8	0.911	0.911	0.910	0.910	0.909	0.909	0.909	0.908	0.908	0.907
2.9	0.907	0.906	0.906	0.905	0.905	0.905	0.904	0.904	0.903	0.903
3.0	0.903	0.902	0.902	0.902	0.901	0.901	0.901	0.900	0.900	0.900

Tabel A4. Tabel af F_C til beregning af C parameteren ved hjælp af middelværdi og varians for en Weibull-fordeling (jfr. afsnit 3.4).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
.60	1.231	1.234	1.237	1.240	1.242	1.245	1.248	1.251	1.253	1.256
.61	1.259	1.262	1.265	1.267	1.270	1.273	1.276	1.279	1.282	1.284
.62	1.287	1.290	1.293	1.296	1.299	1.302	1.305	1.308	1.311	1.314
.63	1.317	1.320	1.323	1.326	1.329	1.332	1.335	1.338	1.341	1.344
.64	1.348	1.351	1.354	1.357	1.360	1.363	1.367	1.370	1.373	1.376
.65	1.379	1.383	1.386	1.389	1.393	1.396	1.399	1.403	1.406	1.409
.66	1.413	1.416	1.419	1.423	1.426	1.430	1.433	1.437	1.440	1.444
.67	1.447	1.451	1.454	1.458	1.461	1.465	1.469	1.472	1.476	1.480
.68	1.483	1.487	1.491	1.495	1.498	1.502	1.506	1.510	1.513	1.517
.69	1.521	1.525	1.529	1.533	1.537	1.541	1.545	1.549	1.553	1.557
.70	1.561	1.565	1.569	1.573	1.577	1.581	1.585	1.590	1.594	1.598
.71	1.602	1.606	1.611	1.615	1.619	1.624	1.628	1.633	1.637	1.641
.72	1.646	1.650	1.655	1.659	1.664	1.668	1.673	1.678	1.682	1.687
.73	1.692	1.696	1.701	1.706	1.711	1.716	1.721	1.725	1.730	1.735
.74	1.740	1.745	1.750	1.755	1.760	1.765	1.771	1.776	1.781	1.786
.75	1.791	1.797	1.802	1.807	1.813	1.818	1.824	1.829	1.835	1.840
.76	1.846	1.851	1.857	1.863	1.868	1.874	1.880	1.886	1.892	1.898
.77	1.904	1.910	1.916	1.922	1.928	1.934	1.940	1.946	1.952	1.959
.78	1.965	1.971	1.978	1.984	1.991	1.997	2.004	2.011	2.017	2.024
.79	2.031	2.038	2.045	2.051	2.058	2.065	2.073	2.080	2.087	2.094
.80	2.101	2.109	2.116	2.124	2.131	2.139	2.146	2.154	2.162	2.170
.81	2.177	2.185	2.193	2.201	2.209	2.218	2.226	2.234	2.242	2.251
.82	2.259	2.268	2.277	2.285	2.294	2.303	2.312	2.321	2.330	2.339
.83	2.348	2.358	2.367	2.377	2.386	2.396	2.406	2.415	2.425	2.435
.84	2.445	2.456	2.466	2.476	2.487	2.498	2.508	2.519	2.530	2.541
.85	2.552	2.563	2.575	2.586	2.598	2.609	2.621	2.633	2.645	2.657
.86	2.670	2.682	2.695	2.707	2.720	2.733	2.746	2.760	2.773	2.787
.87	2.801	2.814	2.829	2.843	2.857	2.872	2.886	2.901	2.916	2.932
.88	2.947	2.963	2.979	2.995	3.011	3.028	3.044	3.061	3.078	3.096
.89	3.113	3.131	3.149	3.168	3.186	3.205	3.224	3.244	3.263	3.283
.90	3.304	3.324	3.345	3.366	3.388	3.410	3.432	3.454	3.477	3.501

Tabel A5. Tabel af F_A til beregning af A parameteren ved hjælp af middelværdi og varians for en Weibull-fordeling (jfr. afsnit 3.4).

Bemærk at F_A varierer meget lidt, og at værdien normalt kan sættes til 1,126.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.0	1.000	1.004	1.008	1.012	1.016	1.020	1.023	1.027	1.030	1.033
1.1	1.036	1.039	1.042	1.045	1.048	1.051	1.053	1.056	1.058	1.061
1.2	1.063	1.065	1.068	1.070	1.072	1.074	1.076	1.077	1.079	1.081
1.3	1.083	1.084	1.086	1.088	1.089	1.091	1.092	1.093	1.095	1.096
1.4	1.097	1.098	1.100	1.101	1.102	1.103	1.104	1.105	1.106	1.107
1.5	1.108	1.109	1.109	1.110	1.111	1.112	1.113	1.113	1.114	1.115
1.6	1.115	1.116	1.117	1.117	1.118	1.118	1.119	1.119	1.120	1.120
1.7	1.121	1.121	1.122	1.122	1.122	1.123	1.123	1.124	1.124	1.124
1.8	1.124	1.125	1.125	1.125	1.126	1.126	1.126	1.126	1.127	1.127
1.9	1.127	1.127	1.127	1.127	1.128	1.128	1.128	1.128	1.128	1.128
2.0	1.128	1.128	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129
2.1	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129
2.2	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129
2.3	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.128	1.128	1.128	1.128	1.128
2.4	1.128	1.128	1.128	1.128	1.128	1.128	1.127	1.127	1.127	1.127
2.5	1.127	1.127	1.127	1.127	1.127	1.126	1.126	1.126	1.126	1.126
2.6	1.126	1.126	1.126	1.125	1.125	1.125	1.125	1.125	1.125	1.125
2.7	1.125	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.123	1.123	1.123
2.8	1.123	1.123	1.123	1.123	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
2.9	1.121	1.121	1.121	1.121	1.121	1.121	1.121	1.120	1.120	1.120
3.0	1.120	1.120	1.120	1.119	1.119	1.119	1.119	1.119	1.119	1.118

Tabel A6. Tabel til beregning af middeleffekt. Tabellen giver $G_C(\xi)$, (jfr. afsnit 3.5).

C											
	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
ξ	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.05	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
	0.10	0.099	0.099	0.099	0.099	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
	0.15	0.147	0.147	0.148	0.148	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.150
	0.20	0.193	0.194	0.195	0.196	0.197	0.197	0.198	0.198	0.199	0.199
	0.25	0.238	0.240	0.241	0.243	0.244	0.245	0.246	0.246	0.247	0.248
	0.30	0.281	0.284	0.286	0.288	0.290	0.291	0.292	0.294	0.294	0.296
	0.35	0.323	0.326	0.329	0.332	0.334	0.336	0.338	0.339	0.341	0.343
	0.40	0.363	0.367	0.371	0.374	0.377	0.380	0.382	0.384	0.386	0.389
	0.45	0.400	0.406	0.410	0.414	0.418	0.421	0.424	0.427	0.429	0.433
	0.50	0.436	0.443	0.448	0.453	0.457	0.461	0.465	0.468	0.471	0.476
	0.55	0.471	0.478	0.484	0.489	0.495	0.499	0.503	0.507	0.511	0.517
	0.60	0.503	0.511	0.518	0.524	0.530	0.535	0.540	0.544	0.549	0.556
	0.65	0.533	0.542	0.550	0.557	0.563	0.569	0.574	0.580	0.584	0.589
	0.70	0.562	0.571	0.579	0.587	0.594	0.601	0.607	0.612	0.618	0.622
	0.75	0.589	0.599	0.607	0.616	0.623	0.630	0.637	0.643	0.649	0.654
	0.80	0.614	0.624	0.634	0.642	0.650	0.658	0.665	0.671	0.677	0.683
	0.85	0.638	0.648	0.658	0.667	0.675	0.683	0.690	0.697	0.704	0.710
	0.90	0.660	0.671	0.680	0.690	0.698	0.706	0.714	0.721	0.727	0.734
	0.95	0.681	0.691	0.701	0.711	0.719	0.727	0.735	0.742	0.749	0.756
	1.00	0.700	0.710	0.720	0.730	0.739	0.747	0.755	0.762	0.769	0.775
	1.05	0.717	0.728	0.738	0.747	0.756	0.764	0.772	0.779	0.786	0.792
	1.10	0.734	0.744	0.754	0.763	0.772	0.780	0.788	0.795	0.801	0.808
	1.15	0.749	0.759	0.769	0.778	0.786	0.794	0.801	0.808	0.815	0.821
	1.20	0.763	0.773	0.782	0.791	0.799	0.807	0.814	0.820	0.827	0.832

Tabel A.6. Fortsat.

C												
	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	
ξ	1.25	0.776	0.786	0.795	0.803	0.811	0.818	0.825	0.831	0.837	0.842	0.847
	1.30	0.788	0.797	0.806	0.814	0.821	0.828	0.834	0.840	0.845	0.851	0.855
	1.35	0.799	0.807	0.816	0.823	0.830	0.836	0.842	0.848	0.853	0.858	0.862
	1.40	0.809	0.817	0.825	0.832	0.838	0.844	0.849	0.854	0.859	0.863	0.867
	1.45	0.818	0.826	0.833	0.839	0.845	0.850	0.855	0.860	0.864	0.868	0.872
	1.50	0.826	0.833	0.840	0.846	0.851	0.856	0.861	0.865	0.869	0.872	0.875
	1.55	0.834	0.840	0.846	0.852	0.857	0.861	0.865	0.869	0.872	0.875	0.878
	1.60	0.841	0.847	0.852	0.857	0.861	0.865	0.869	0.872	0.875	0.878	0.880
	1.65	0.847	0.852	0.857	0.861	0.865	0.869	0.872	0.875	0.877	0.880	0.882
	1.70	0.853	0.857	0.862	0.865	0.869	0.872	0.875	0.877	0.879	0.882	0.884
	1.75	0.858	0.862	0.866	0.869	0.872	0.874	0.877	0.879	0.881	0.883	0.885
	1.80	0.863	0.866	0.869	0.872	0.874	0.877	0.879	0.880	0.882	0.884	0.885
	1.85	0.867	0.870	0.872	0.874	0.877	0.878	0.880	0.882	0.883	0.884	0.886
	1.90	0.871	0.873	0.875	0.877	0.878	0.880	0.881	0.882	0.884	0.885	0.886
	1.95	0.874	0.876	0.877	0.879	0.880	0.881	0.882	0.883	0.884	0.885	0.887
	2.00	0.877	0.878	0.879	0.880	0.881	0.882	0.883	0.884	0.885	0.886	0.887
	2.05	0.880	0.881	0.881	0.882	0.882	0.883	0.884	0.884	0.885	0.886	0.887
	2.10	0.882	0.883	0.883	0.883	0.883	0.884	0.884	0.885	0.885	0.886	0.887
	2.15	0.885	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.885	0.885	0.886	0.887
	2.20	0.887	0.886	0.885	0.885	0.885	0.885	0.885	0.885	0.886	0.886	0.887
	2.25	0.889	0.887	0.886	0.886	0.885	0.885	0.885	0.885	0.886	0.886	0.887
	2.30	0.890	0.889	0.887	0.886	0.886	0.885	0.885	0.885	0.886	0.886	0.887
	2.35	0.892	0.890	0.888	0.887	0.886	0.885	0.885	0.885	0.886	0.886	0.887
	2.40	0.893	0.891	0.889	0.887	0.886	0.886	0.885	0.885	0.886	0.886	0.887
	2.45	0.894	0.891	0.889	0.888	0.886	0.886	0.885	0.885	0.886	0.886	0.887

Tabel A6. Fortsat.

C

	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
2.50	0.895	0.892	0.890	0.888	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
2.55	0.896	0.893	0.890	0.888	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
2.60	0.897	0.893	0.890	0.888	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
2.65	0.898	0.894	0.891	0.888	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
2.70	0.898	0.894	0.891	0.889	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
2.75	0.899	0.894	0.891	0.889	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
2.80	0.899	0.895	0.891	0.889	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
2.85	0.900	0.895	0.891	0.889	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
2.90	0.900	0.895	0.892	0.889	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
2.95	0.900	0.895	0.892	0.889	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
3.00	0.901	0.896	0.892	0.889	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
3.05	0.901	0.896	0.892	0.889	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
3.10	0.901	0.896	0.892	0.889	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
3.15	0.901	0.896	0.892	0.889	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
3.20	0.902	0.896	0.892	0.889	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887
∞	0.903	0.897	0.892	0.889	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.887

APPENDIKS B

Samtidighed og varighed

Bl. Samtidighed

Kendes effektkarakteristikken for en given vindmølle, er det ved hjælp af Vindatlasset muligt at estimere sandsynligheden for en given effektproduktion for møllen anbragt i et givet terræn. I kapitel 3 har vi vist to eksempler på en sådan beregning af produktionssandsynlighedskurven (eller varighedskurven). Tænker vi os nu et antal møller anbragt så tæt ved hinanden, at den "fri" vind er den samme for alle møllerne til hvert tidspunkt, men dog så langt fra hinanden at de ruhedsmæssigt kan være anbragt i forskellige terræntyper, kan vi beregne en middelproduktionssandsynlighed for det samlede system af møller. Derefter kan vi forestille os møllerne spredt over landet og igen beregne en middelproduktionssandsynlighed for det spredte, men koblede system af møller. De efterfølgende beregninger er udført således, at den valgte mølletype svarer til Nibe-mølle A (navhøjde 45 m), og det valgte terræn til Nibe-møllens placering. Det sidste valg betyder, at de anvendte måleserier korrigeres for højde over terræn og ruhedsklasse i de otte retningssektorer. Med andre ord beregner vi for et antal (6) Nibe-møller anbragt i et terræn svarende til Nibe-placeringen, men spredt over landet.

Ved beregningen har vi benyttet vinddata fra de 6 flyvestationer: Ålborg, Karup, Tirstrup, Skrydstrup, Beldringe og Værløse, disse giver en ganske god geografisk dækning, når undtages Bornholm. På grund af manglende natobservationer fra Avnø og Rønne er disse to stationer ikke medtaget. For hver flyvestation er vindhastigheden ved hjælp af ruhedsklassifikationen og højdevariationen af skalaparameteren A (appendiks A) blevet ekstrapoleret til 45 meters højde over et terræn af ruhedsklasse 1 i alle sektorer undtagen SV, V og NV, hvor ruhedsklasse 0 er be-

nyttet. Den valgte ruhedsfordeling svarer til ruhedsfordelingen ved Nibe-bredding, hvor de to Nibe-forsøgsmøller er opstillet. Ved hjælp af den teoretiske kurve for den mekaniske akseleffekt af Nibe-mølle A og den beregnede vind i 45 meter, er så for hver flyvestation beregnet en tidsserie af effektproduktion. Udfra disse serier har vi beregnet produktionssandsynlighedskurven for hver flyvestation og den tilsvarende kurve for middelværdien af produktionen for de seks møller koblet sammen. Figur B1 viser middelværdien af effektsandsynlighedskurven for én mølle sammenlignet med sandsynlighedskurven for produktionen pr. mølle i det sammenkoblede net af geografisk spredte møller. Vi ser, at systemet af spredte møller har mindre sandsynlighed for ingen produktion og mindre sandsynlighed for maksimal produktion. Dette er hvad man skulle forvente, og det betyder, at vi har en mere stabil forsyning fra et sådan net sammenlignet med en enkelt mølle. Det er imidlertid også klart, at en virkelig effektiv forbedring kræver langt større separation af møllerne, et forhold der følger umiddelbart af, at vejrsystemerne har en udstrækning på tusinde til flere tusinde km.

En effektiv forbedring fås først ved en geografisk spredning af møllerne, der svarer til flere gange vejrsystemernes udstrækning, altså mange tusinde km.

B2. Varighed

Vi vil her beskæftige os med den statistik, der knytter sig til varigheden af perioder med en given vindhastighed. Vi har i kapitel 3 defineret produktionssandsynlighedskurven for en vindmølle som den akkumulerede sandsynlighedsfordeling for møllens producerede effekt. Kurven angiver således den forventede brøkdelen af tiden i hvilken effekten overskrider et givet niveau. Denne kurve kaldes også varighedskurven (Power-duration-curve), selvom den strengt taget ikke indeholder nogen information om den tidslige længde af perioder med en given produktion. Den yderligere information, vi kunne tænke os i denne forbindelse, er hvorvidt en given effekt produceres fortrinsvis i lange, men relativt sjældne, sammenhængende perioder, eller om produktionen foregår i kortere og hyppigere perioder.

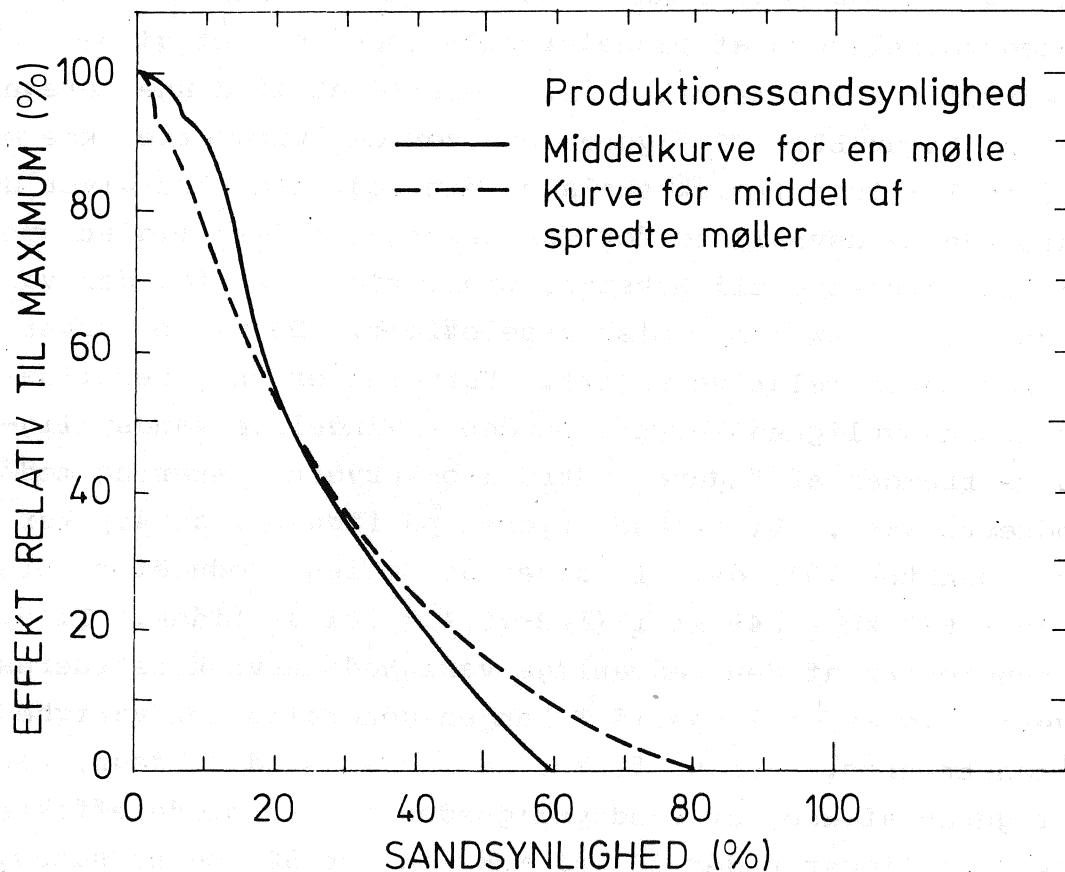


Fig. B1.

Produktionssandsynlighedskurver for henholdsvis én mølle og et system af 6 geografisk spredte møller beregnet på grundlag af vinddata fra 6 flyvestationer og effektkarakteristik for Nibe mølle A.

For at undersøge dette er det nødvendigt at benytte en specifik møllekarakteristik og en meget lang dataserie af vindhastigheden i navhøjde. Vi har her som i samtidighedsanalysen benyttet effektkarakteristikken for Nibe mølle A. For vindhastigheden har vi benyttet den målte vindhastighed på Risø i 76 meters højde. På grund af den højere middelruhed omkring Risø svarer middelproduktionen beregnet på grundlag af denne serie nært til den forventede middelproduktion af mølle A ved Nibe, beregnet ved hjælp af Vindatlasset.

På grundlag af 21 års målinger for hver time og effektkarakteristikken har vi beregnet en tilsvarende serie af effektproduk-

tionen, og ved hjælp af denne tidsserie har vi beregnet sandsynlighedsfordelingen af middelproduktionen over et givet tidsinterval fra 1 time til 1 år. Resultatet af denne beregning er vist på figur B2. På figuren angiver den vandrette akse midlingstiden T i logaritmisk skala og den lodrette akse giver den akkumulerede sandsynlighed for den relative effekt midlet over T , med 100% svarende til maksimal produktion, der for den valgte mølletype er 622 kW i mekanisk akseeffekt. De viste kurver er kurver for samme relative effekt. Kurverne er en generalisation af effektsandsynlighedskurven, og den almindelige sandsynlighedskurve fremgår af figuren udfra iso-kurvernes skæring med den lodrette akse. Vi aflæser f.eks. på figuren, at 40% kurven skærer i punktet 70%, det vil sige, at møllen producerer mere end $0.40 \cdot 622 \text{ kW} = 249 \text{ kW}$ i $(100-70)\% = 30\%$ af tiden. Tilsvarende kan resten af den sædvanlige varighedskurve konstrueres. For hvert valg af midlingstid T kan en generaliseret varighedskurve konstrueres. Ser vi f.eks. på midlingstid 14 døgn, kan vi på figuren aflæse, at sandsynligheden for at middeleffekten over 14 døgn ligger under 10% af maksimum er 5%, og at sandsynligheden for at den ligger under 30% af maksimum er 55%, hvilket vil sige, at middeleffekten med en sandsynlighed på 50% kan forventes at ligge i intervallet fra 62 kW til 187 kW.

Af speciel interesse er det at se på sandsynligheden for forekomsten af lange perioder med forsvindende produktion, for eksempel med en produktion mindre end eller lig 1% af maksimaleffekten. Denne sandsynlighedsfordeling aflæses umiddelbart af figuren, idet den følger kurven mærket "1". Vi kan således aflæse, at sandsynligheden for mindre end 1% produktion over 24 timer er 8%.

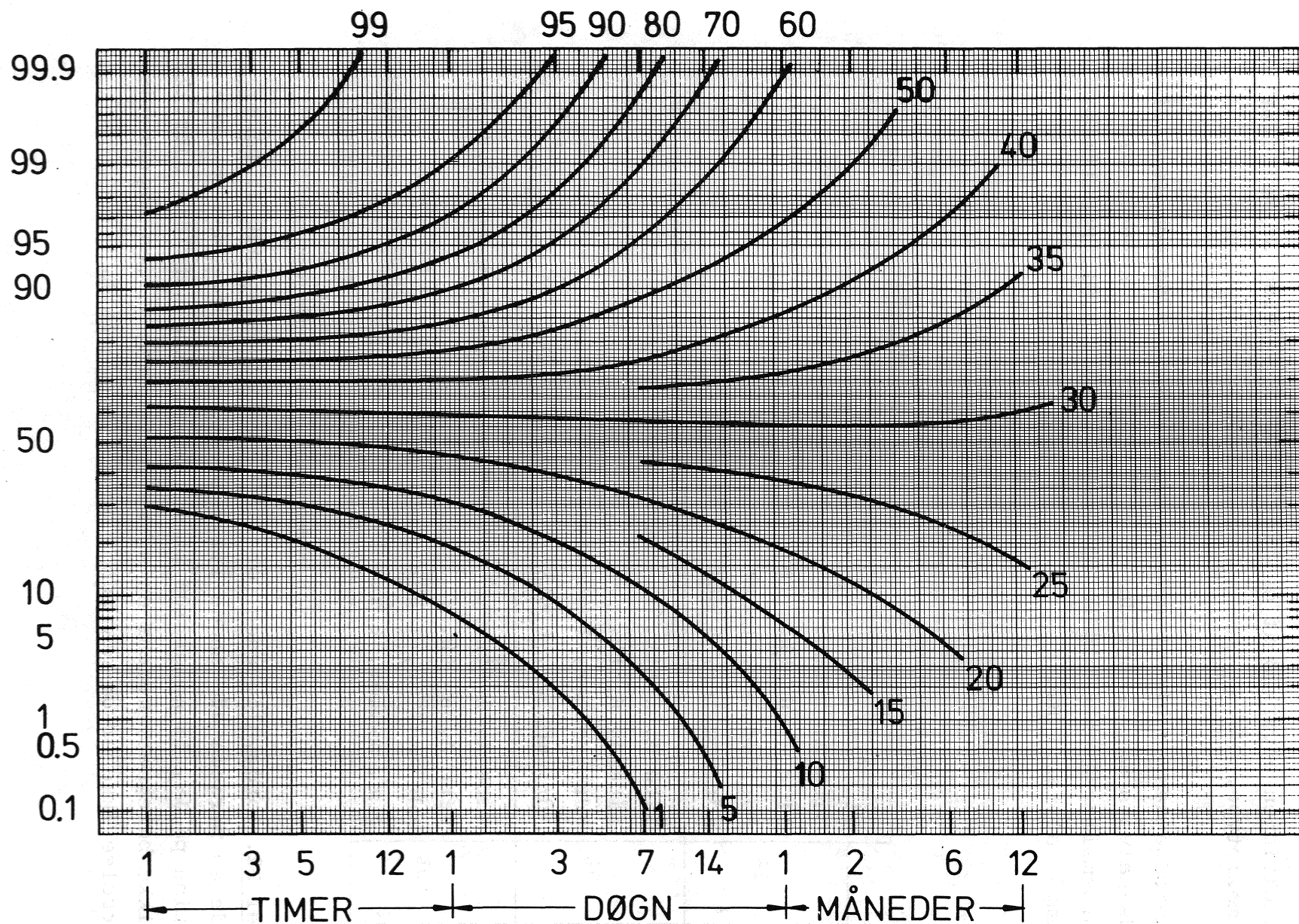


Fig. B2. Den akkumulerede sandsynlighed for middeleffekten som funktion af midlingstiden vist ved kurver for samme relative effekt. Tallene på kurverne angiver procent af maksimal effekt.

Vi har yderligere undersøgt, hvorledes sandsynligheden for perioder med en produktion på henholdsvis 1%, 5% og 10% af maksimal produktionen påvirkes af en geografisk spredning af møllerne og af mølletype.

Undersøgelsen er blevet gennemført på samme måde som samtidighedsanalysen med en spredning af 6 vindmøller, henholdsvis 6 Nibemøller-A og 6 mindre møller (eksempel 3.9). Resultatet fremgår af tabel B2.

			Antal dage					
			1	2	4	10	30	
Effekt relativ til maximum	1%	Mølle(r)						
		Nibe A, 1 stk.	8.1	3.5	0.8	0.04	-	
		Nibe A, 6 stk.	2.6	0.6	0.1			
		Mdr. møller, 1 stk	9.3	3.2	0.8			
	5%	Mdr. møller, 6 stk	1.2	0.1	-			
		Nibe A, 1 stk.	20.0	13.1	6.8	1.7	-	
		Nibe A, 6 stk.	11.7	5.9	1.8			
		Mdr. møller, 1 stk	19.4	12.4	7.0			
	10%	Mdr. møller, 6 stk	7.5	3.5	1.2			
		Nibe A, 1 stk.	30.9	24.2	16.6	8.2	0.8	
		Nibe A, 6 stk.	23.5	14.4	7.6			
		Mdr. møller, 1 stk	29.2	22.3	15.2			
			Mdr. møller, 6 stk	17.2	9.1	2.9		
			Sandsynlighed %					

Tabel B2. Sandsynligheden for til et givet tidspunkt at påbegynde en periode af længde 1,2,4,10 eller 30 dage med en produktion på 1%, 5% eller 10% af maksimum. Ikke udfyldte rubrikker er ikke beregnet, medens en streg indikerer, at den pågældende størrelse ikke er observeret i de benyttede data.

APPENDIKS C

Elementer af det fysiske og statistiske grundlag

Cl. Den geostrofiske vind

Et velkendt strømmingssystem, der ofte ses på vejrkort, er et, hvor vinden i en højde ca. 1000 meter over jordens overflade blæser parallelt med isobarerne (kurver med konstant tryk) med det lave tryk til venstre og med en hastighed, der vokser proportionalt med trykgradienten. Hvis en luftpartikel starter en acceleration ind mod et lavtryk, så vil corioliskraften, der er en kraft forårsaget af jordens rotation, påvirke partiklen og dreje den mod højre (på den nordlige halvkugle). Resultatet er, at partiklen cirkler rundt om lavtrykket.

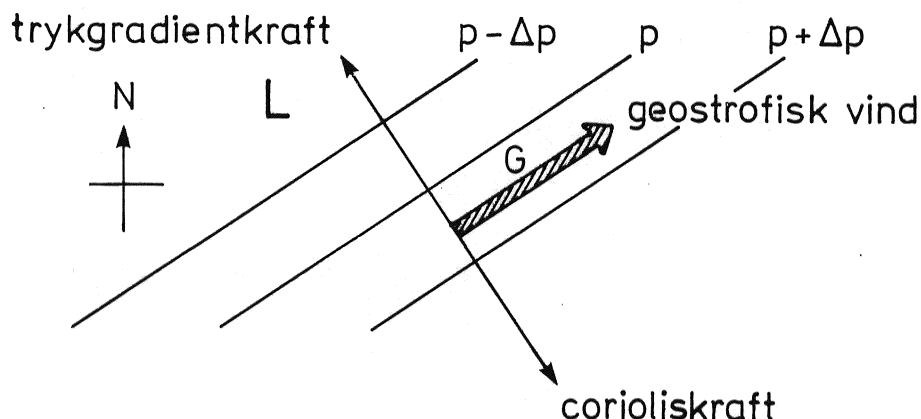


Fig. Cl. Den geostrofiske vind

I det tilfælde, hvor isobarerne er meget nær rette linier, vil den vindhastighed, der kan beregnes som værende i balance mellem corioliskraften og trykgradientkraften, ofte være en overordentlig god tilnærmelse til den virkeligt observerede vind i

en kilometers højde over jordoverfladen. Denne vindhastighed benævnes den geostrofiske vind (fig. C1).

En forudsætning for en god tilnærmelse er især, at luften ikke accelereres, og at friktionskræfterne er forsvindende.

Begrebet den geostrofiske vind er meget vigtigt inden for meteorologien, fordi det giver en direkte relation mellem en trykfordeling over et bestemt område i atmosfæren og et hypotetisk vindfelt i det samme område, som ofte er meget nær ved at være identisk med det observerede vindfelt.

Den geostrofiske vind kan bestemmes direkte ud fra et sæt af trykmålinger. Denne fremgangsmåde er anvendt i Vindatlasset, idet der er tilpasset en 3. ordens flade til trykværdierne, og ud fra denne flades hældning er den geostrofiske vind bestemt.

Trykanalysen er foretaget for årene 1965-77, begge inklusive, og er baseret på trykmålinger foretaget hver 3. time i Danmark og nabolande. De benyttede stationer er vist i fig. C2.



Fig. C2. Placeringen af de benyttede synop stationer.

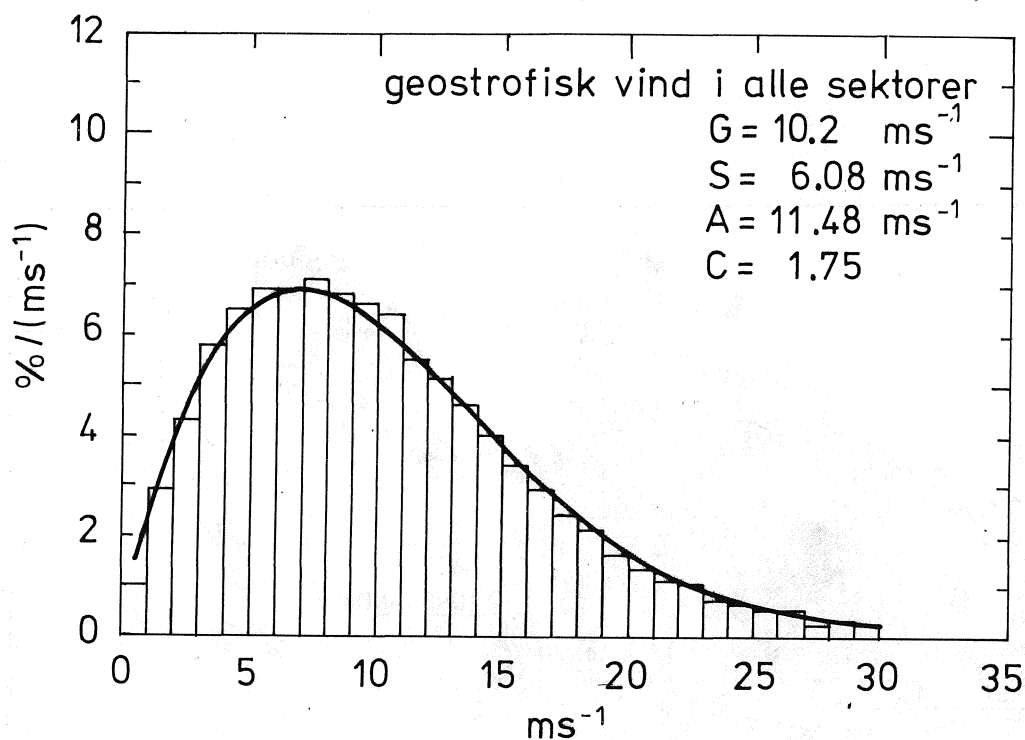


Fig. C3. Fordelingen af den geostrofiske vind.

C2. Det planetare grænselag

Den geostrofiske tilnærmelse kan ikke anvendes, hvor friktionskræfterne er store sammenlignet med trykkræfterne og corioliskraften. Det lag over jordens overflade, hvor vinden er påvirket af friktionskræfter på grund af nærheden til overfladen, kaldes det planetare grænselag. I dette lag ændre vindhastigheden sig med højden, og der skabes hvirvler (turbulens), der bevirker at vinden variere i hastighed og retning omkring middelværdien. En overskyet dag med god vind er dette lag ca. 1 km tykt; i natter uden skydække og med svag vind kan tykkelsen være mindre end 100 meter.

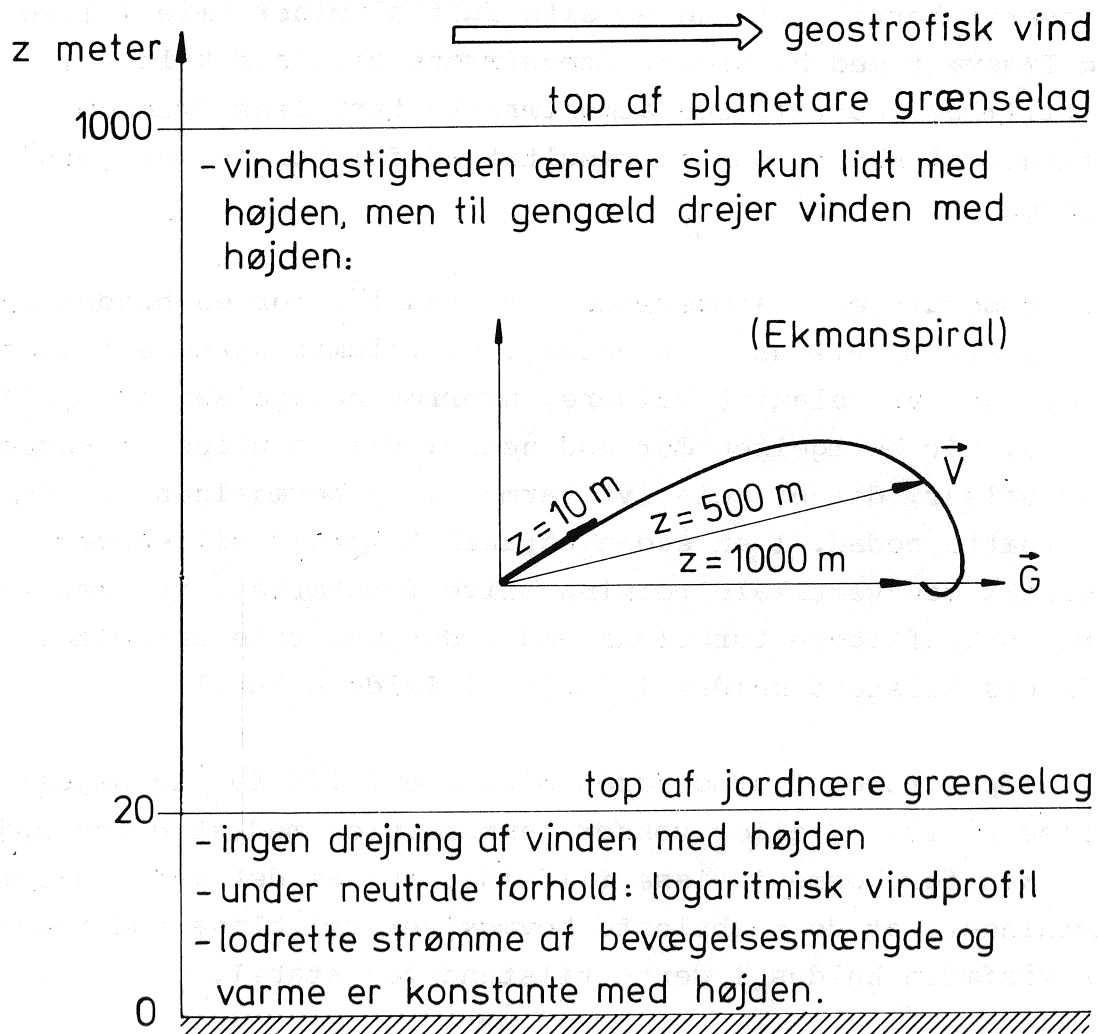


Fig. C4. Det planetare grænselag

C3. Grænselagets stabilitet

Her skal kort omtales et begreb, der er meget vigtigt ved beskrivelser af luftens bevægelser i det planetare grænselag nemlig den såkaldte statiske stabilitet af atmosfæren i dette lag.

Flyttes et lille luftvolumen en længde Δz i op- eller nedadgående retning, vil det udvides, henholdsvis sammenpresses på grund af trykforholdene i atmosfæren, hvorved dets temperatur vil falde henholdsvis stige lidt. Temperaturændringen ΔT for en sådan bevægelse Δz svarer til en ændring på 1°C for en højdeændring på 100 m.

Hvis den omgivende atmosfære har en temperaturfordeling, der netop svarer hertil, vil de enkelte luftvoluminer være i ligegyldig ligevægt med hinanden. Atmosfærens tilstand kaldes i dette tilfælde neutral. Den atmosfæriske turbulens fremkommer i så fald udelukkende som et resultat af friktionen mod jordoverfladen.

Falder temperaturen i atmosfæren mere end 1°C for en højdeforøgelse på 100 m, vil det før betragtede volumen ankomme til omgivelser, der er relativt koldere, hvorfor bevægelsen opad vil fortsætte. Går bevægelsen derimod nedad, vil voluminet ankomme til omgivelser, der er relativt varmere, og bevægelsen vil derfor fortsætte nedad. I en sådan ustabil tilstand vil enhver bevægelse i den vertikale retning blive forstærket, hvilket vil medføre en kraftigere turbulens end i det neutrale tilfælde. Atmosfærens tilstand kaldes i dette tilfælde ustabil.

Falder temperaturen i atmosfæren mindre end 1°C for en højdeforøgelse på 100 m, eller vokser temperaturen med stigende højde, hvilket kan forekomme i visse tilfælde, indses det ved analoge betragtninger, at de turbulente bevægelser vil blive modarbejdet. Atmosfæren kaldes i denne tilstand for stabil.

En statistik beregnet på grundlag af 10 års målinger fra Risø's meteorologimast viser, at ustabile, neutrale og stabile atmosfæriske tilstande tilnærmelsesvis forekommer i henholdsvis 6%, 60% og 34% af tiden.

Stabilitetsforholdene i den jordnære del af atmosfæren influerer stærkt på vindforholdene. En betragtelig del af vindhastighedens variation over døgnet og over året skyldes således variationer i stabiliteten (fig. C5 og C6).

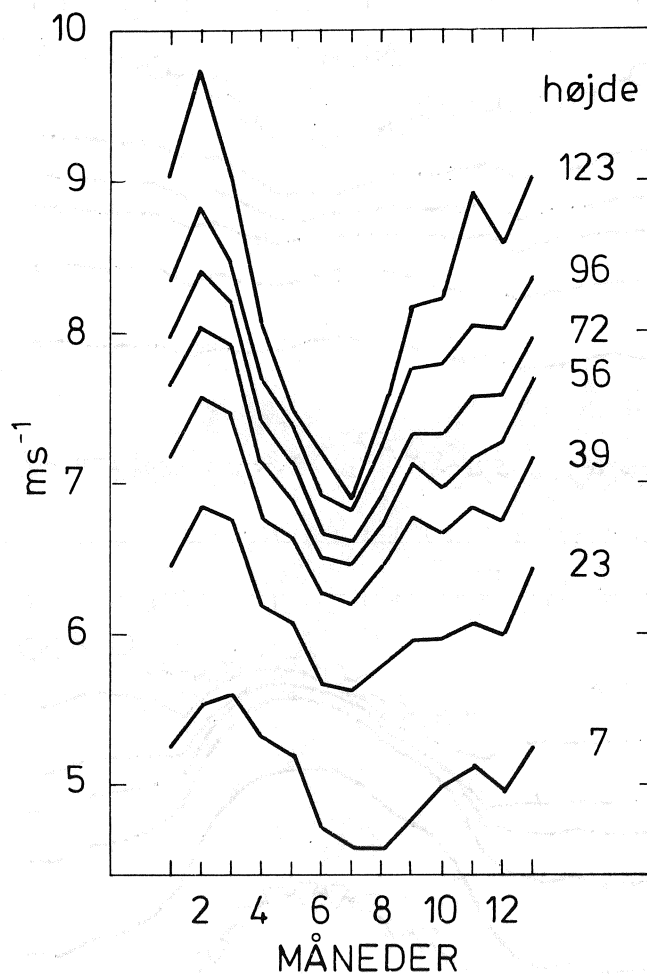


Fig. C5. Variationen over året af månedernes middelvindhastigheder vist for syv højder. Målt på Risø 1958-67.

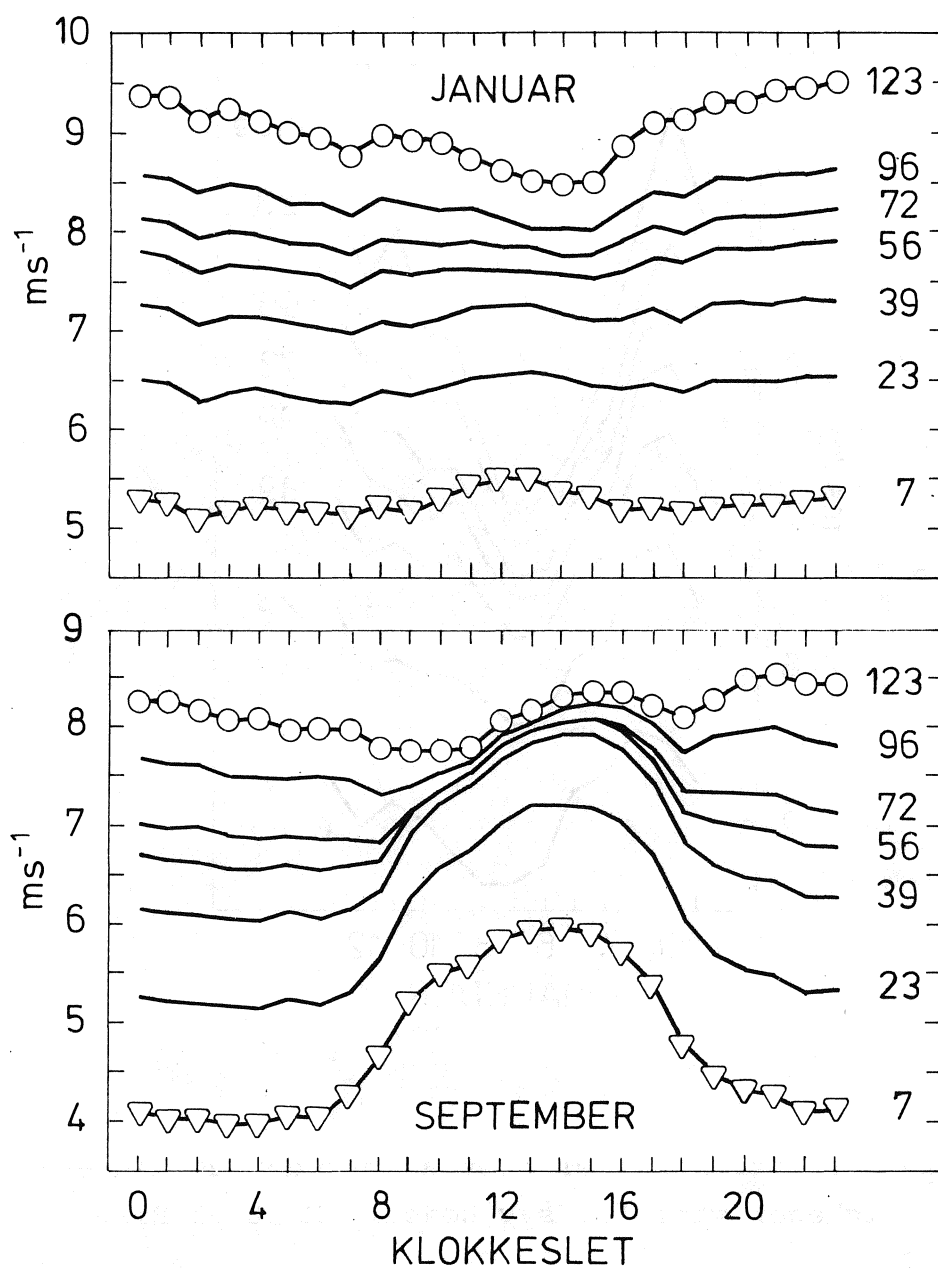


Fig. C6. Den daglige variation af den horisontale vindhastighed for månederne januar og september. På de enkelte kurver er angivet målehighden. Målt på Risø 1958-67.

C4. Den anvendte metode

Grundlaget for den metode, som er anvendt i Vindatlasset, er den geostrofiske modstands lov, der udtrykker friktionskraften ved jordoverfladen som funktion af den geostrofiske vind, der i denne sammenhæng behandles som en ydre drivende kraft. De væsentligste forudsætninger er at det turbulente grænselag er i ligevægt med en med højden konstant geostrofisk vind, og at den statiske stabilitet i dette grænselag ligeledes er konstant med højden. Ved udarbejdelsen af Vindatlasset har valget været mellem en statistisk analyse af eksisterende vindmålinger, og en anvendelse af den geostrofiske modstandslov i forbindelse med det analyserede trykfelt. Ønsker man at benytte den første metode, forudsætter det, at man råder over en række måleserier af vindhastigheden fra målemaster anbragt i rimeligt homogene områder. For at man herudfra skal kunne konstruere et Vindatlas kræves desuden, at der er målinger fra en række højder, og at målingerne er af god kvalitet. Som det fremgår af Vindatlasset er vindmålinger især i relativ lav højde over terræn stærkt influeret af terrænet i målerens umiddelbare omgivelser, og det er vanskeligt at systematisere spredte vindmålinger uden at benytte et eller andet teoretisk apparat, der muliggør en skelnen mellem væsentlige og uvæsentlige komplikationer. Der er to væsentlige fordele ved den anvendte metode. For det første benytter vi overfladetrykobervationer, som er langt mindre påvirkede af lokale forhold end vindmålingerne, og som findes fra en lang række stationer i det synoptiske net. For det andet har vi ikke benyttet vindobservationer til bestemmelse af vindfordelingerne. De eksisterende måleserier af vinden kan derfor udnyttes til vurdering af metodens nøjagtighed.

C5. Ruhedslængden

Ruhedslængden z_0 kan betragtes som størrelsen af den mindste turbulente hvirvel, der er opstået som følge af luftens gnidning mod jordoverfladen. Den almindelige definition af z_0 er den højde over terræn, hvor middelvindhastigheden er lig nul (fig. C7).

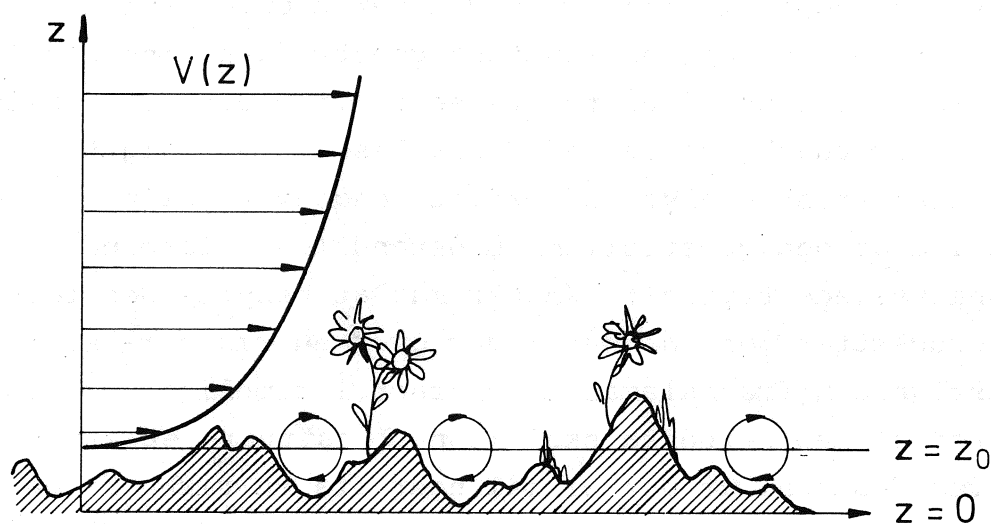


Fig. C7. Ruhedslængden z_0 og middelvindhastighedsprofilen.

Ruhedslængden z_0 kan bestemmes for et givet terræn ved måling af middelvindhastighedens profil langs en 10 til 20 m høj mast under overskyede vejrforhold med god vind (neutral vejr-situation) som skitseret i fig. C8.

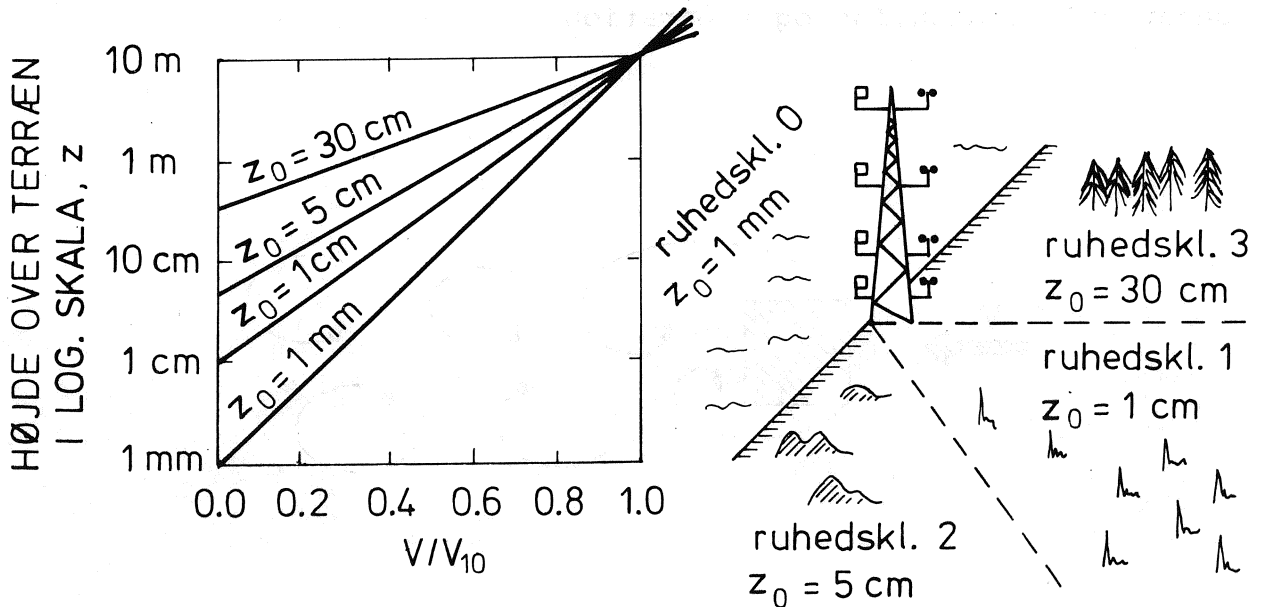


Fig. C8. Måling af z_0 .

I figuren er de målte middelvindhastighedsprofiler indtegnet med en logaritmisk højdeskala, idet profilerne da fremtræder som rette linier. Dette følger af, at det matematiske udtryk for profilerne er

$$V(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} .$$

Ikke alle elementer i terrænet bidrager til ruheden. For at et element kan kaldes et ruhedselement, kræves det at elementet forårsager en øget turbulens i strømmingen hen over det. Nemlig ved hvirvelafløsning og separation fra elementet (fig. C9),

hvilket trækker energi ud af strømmingen og dermed virker som en forøget gnidningskraft mod strømmingen. Bløde lange bakker er således ikke ruhedselementer, da de ikke i sig selv forårsager hvirveldannelse og separation.

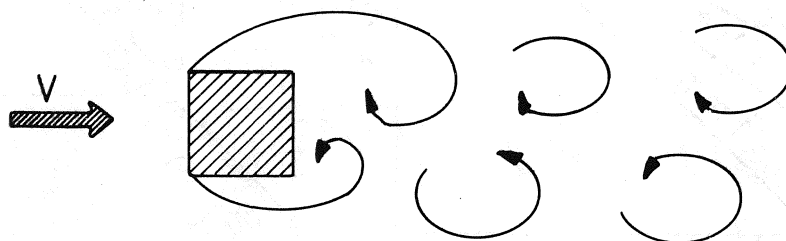


Fig. C9. Hvirveldannelse og separation fra et ruhedselement.

Et ruhedselement kan karakteriseres ved en højde h , et tværsnitsareal S og en porøsitet til vinden. Betragter vi en samling ruhedselementer fordelt jævnt ud over terrænet indgår også det horisontale areal, A , for et ruhedselement. Ved eksperimenter, hvor A er meget større end S , og hvor porøsiteten ikke er af væsentlig betydning, er fundet følgende simple empiriske ligning

$$z_o = 0.5 h \frac{S}{A} \quad (C1)$$

Eksempel C.1

I et terræn med $z_o = 1$ cm anbringes en samling klodser (bygninger) med $h = 5$ m, $S = 100$ m², $A = 1000$ m²

$$z_o = 0.5 \cdot 5 \cdot \frac{100}{1000} = 0.25 \text{ m}$$

dvs. resulterende $z_0 \sim 1 + 25 \text{ cm} \sim 30 \text{ cm}$ svarende til ruhedsklasse 3.

Eksempel C.2

Et meget stort antal 50 m høje møller, hvis rotor har en diameter på 50 m, anbringes i et terræn med $z_0 = 5 \text{ cm}$. Der er en afstand mellem møllerne på $10 \times \text{diameteren} = 500 \text{ m}$. Vi sætter $h = 50 \text{ m}$ (rotoren er ruhedselementet), $S = \pi R^2 \sim 2000 \text{ m}^2$, $A = 500 \cdot 500 = 250000 \text{ m}^2$

$$z_0 = 0.5 \cdot 50 \cdot \frac{2000}{250000} = 0.20 \text{ m}$$

dvs. resulterende $z_0 \sim 5 + 20 \text{ cm} \sim 30 \text{ cm}$ svarende til ruhedsklasse 3. Bemærk at der her er tale om virkningen af et meget stort antal møller, og at resultatet derfor ikke umiddelbart kan overføres på mølleparker med et begrænset antal møller.

Beregninger som vist i eksemplerne kan kun betragtes som grove overslag. Det skal desuden bemærkes, at selv om det umiddelbart synes rimeligt at addere ruheder, at der ingen teoretisk baggrund for at gøre det.

Når A og S bliver af samme størrelse, sker der det, at strømmingen så at sige løftes og derefter opfatter toppen af ruhedselementerne som en ny overflade. Dette er netop hvad der sker ved skove som illustreret i fig. C10.

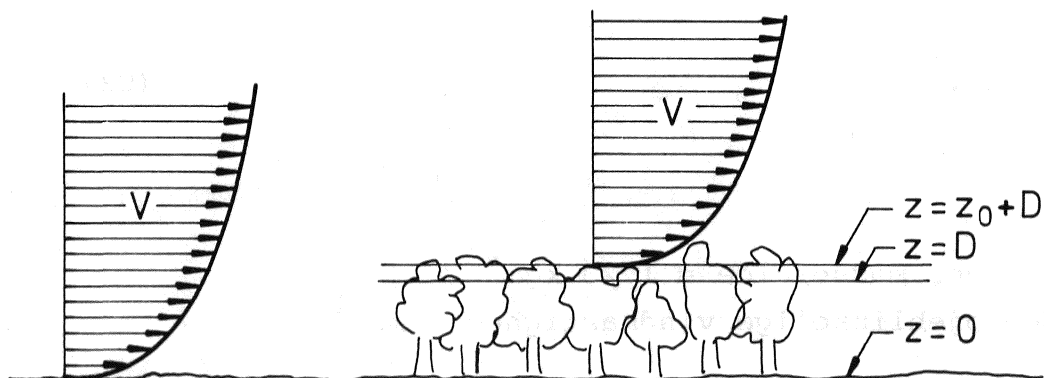


Fig. C10. Vindprofilet ved passage af skov.

Ved beregningerne tages der hensyn til denne effekt ved at indføre størrelsen D , den såkaldte displacementlængde. Det logaritmiske udtryk bliver således

$$V = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z-D}{z_0}$$

Ruhedslængden z_0 er her ruhedslængden for skov, der i almindelighed er væsentlig større end ruheden for det åbne land. Foruden at vindprofilet løftes, sker der en reduktion af vindhastigheden som følge af den forøgede ruhed.

I parentes skal det nævnes, at der også forekommer et vindfelt under og gennem trækronerne, men det er uden relevans for vindenergiformål.

For læhegn kan vi i lign. (C1) sætte $S \sim hL$ og $A \sim \ell L$, hvor L er hegnets længde, og ℓ er afstanden mellem hegnene:

$$z_0 = 0.5 \frac{h^2}{\ell}$$

Eksempelvis bliver z_0 for $h = 10$ m og ℓ lig 1000 m, 500 m og 200 m henholdsvis 0.05, 0.1 og 0.25 m.

C6. Effekttæthed

Teoretisk findes den øjeblikkelige tilstedeværende effekttæthed i en strømning af luft gennem en kvadratmeter vinkelret på strømningen som

$$E(V) = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (C2)$$

hvor

$$\begin{aligned} \rho &= \text{luftens massefylde} = 1.23 \text{ kgm}^{-3} \\ V &= \text{den øjeblikkelige vindhastighed i ms}^{-1} \end{aligned}$$

I Vindatlasset beskæftiger vi os kun med vindhastigheden parallelt med jordoverfladen, og V betegner derfor den horisontale

vindhastighed. Vi har da, at der gennem et areal vinkelret på jordoverfladen bevæges en energimængde pr. sekund pr. m^2 (= effektivtæthed) der er lig med

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} (\text{masse pr. sekund pr. } m^2) \cdot (\text{hastighed})^2 \\ & = \frac{1}{2} \rho V^3 \text{ (kgs}^{-3}\text{)} = \frac{1}{2} \rho V^3 \text{ (Wm}^{-2}\text{)} \end{aligned}$$

C7. Midlingstid

I lign. (C2) er V den øjeblikkelige horizontale vindhastighed i et givet punkt. Til praktisk anvendelse vil vindhastigheden altid være en målt størrelse, V_T , der kan betragtes som dannet ud fra V gennem en midling over tidsrummet T , som skitseret på fig. C11.

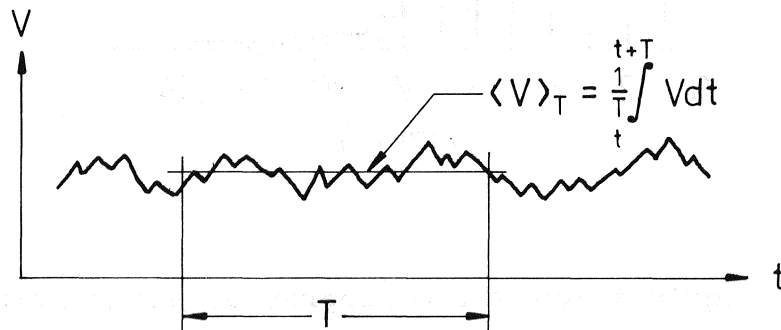


Fig. C11. Dannelselse af middelværdi over tiden T

De i Vindatlasset anvendte og beregnede vindhastigheder kan betragtes som middelværdier dannet over 10 minutter til en time.

C8. Sandsynlighedstæthedsfunktionen

Middelenergiproduktionen, $\langle P \rangle$, kan for en mølle med effekt-karakteristik $P(V)$ bestemmes som

$$P = Pr_1 P(V_1) + Pr_2 P(V_2) + \dots \quad (C3)$$

hvor Pr 'erne er vægte, der angiver, hvor ofte vindhastigheden befinder sig i et givet interval. Pr_1 kan f.eks. være i intervallet fra 0 til 1 m/s og $P(V_1)$ er da effektkarakteristikkens værdi i midtpunktet i dette interval.

Fig. C12 skitserer vægtfunktionen Pr .

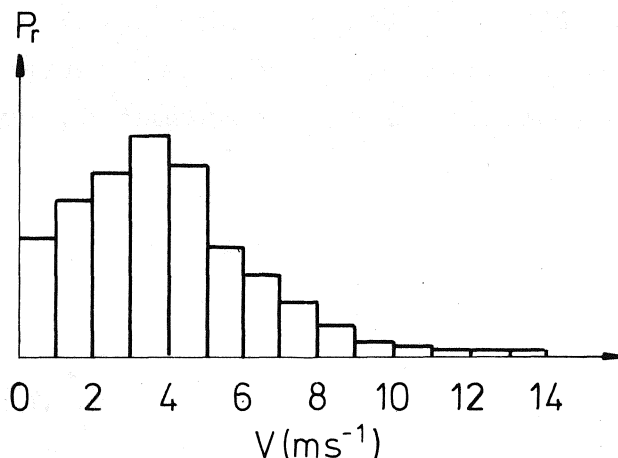


Fig. C12. Vægtfunktion Pr . Histogram af vindhastigheder.

Summen af Pr 'erne er lig 1 (eller 100%). Vægtfunktionen Pr kaldes et histogram.

Gøres intervallængden mindre og mindre, går (under visse forudsætninger) histogrammet over i en kontinuert kurve, den såkaldte sandsynlighedstæthedsfunktion. Denne funktion $Pr(V)$ er skitseret i fig. C13. Det skraverede areal angiver sandsynligheden for at vindhastigheden ligger i intervallet af længden ΔV . Fig. C13 viser også den akkumulerede sandsynlighedstæthedsfunktion $F(V)$, der giver sandsynligheden for at få en vindhastighed mindre eller lig med V . Sandsynligheden for at få en vindhastighed større eller lig med V er da givet ved $1 - F(V)$.

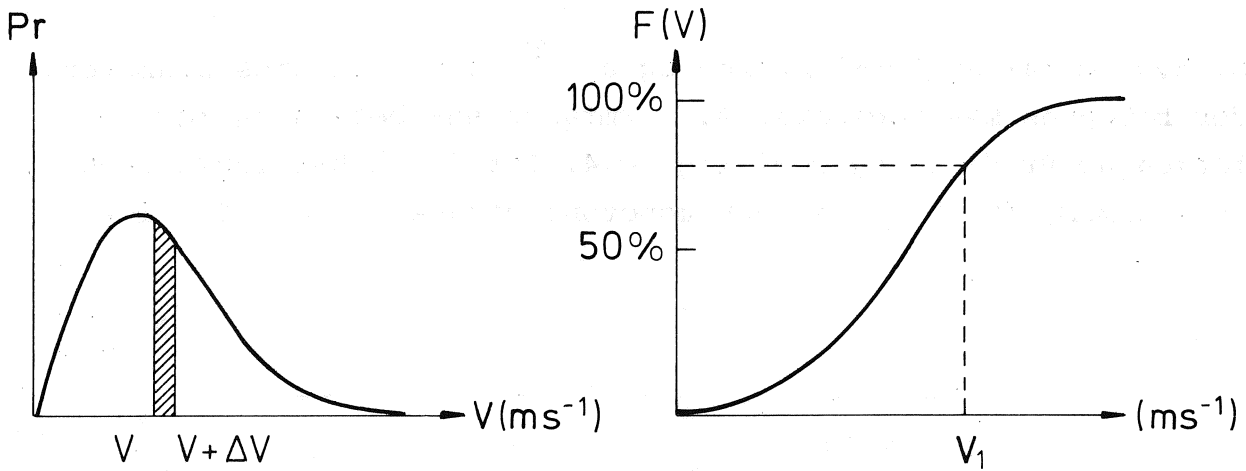


Fig. C13. Sandsynlighedstæthedsfunktion $Pr(V)$ og akkumuleret sandsynlighedstæthedsfunktion $F(V)$.

Sammenhængen mellem $Pr(V)$ og $F(V)$ er

$$F(V) = \int_0^V Pr(V) dV \quad (C4)$$

Vi kan nu skrive lign. C3 som

$$P = \int_0^{\infty} Pr(V) P(V) dV \quad (C5)$$

Lign. (C5) viser tydeligt, hvorfor det for vindenergiformål er vindhastighedens sandsynlighedstæthedsfunktion, der ønskes bestemt. Ikke alene kan P bestemmes, men formen af effekt-karakteristikken $P(V)$ kan forsøges tilpasset formen af $Pr(V)$, således at P bliver størst mulig.

C9. Weibull fordelingen

Weibull fordelingen udtrykkes matematisk som

$$Pr(V) = aC V^{C-1} \exp(-aV^C) \quad (C6)$$

hvor $V \geq 0$, $a > 0$, $C > 0$

og hvor C kaldes formfaktoren og $a^{-1/C}$ er en skalingsparameter, der betegnes med bogstavet A . Formfaktorens betydning for formen af $Pr(V)$ fremgår af fig. C14. For $C > 1$ har funktionen et maximum, for $C \leq 1$ er den monotont aftagende. For $C = 1$ er

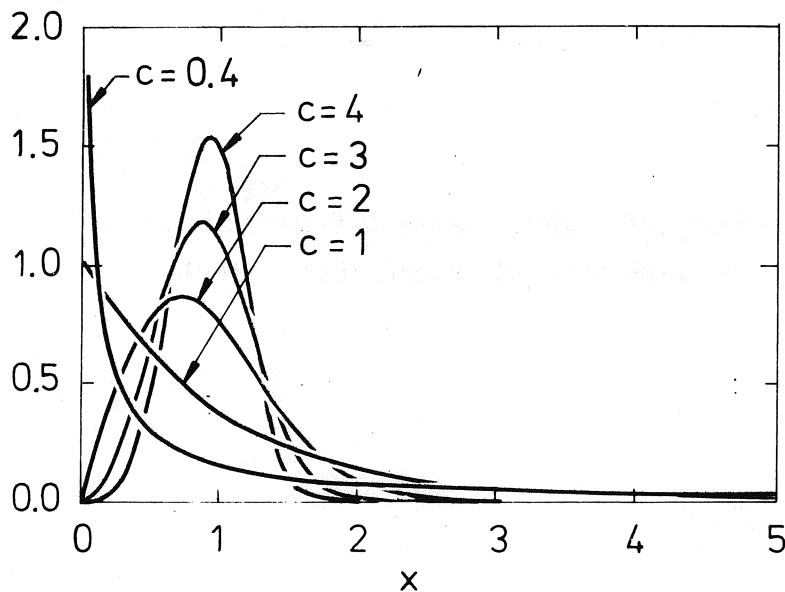


Fig. C14. Formfaktorens betydning for Weibull fordelings form.

fordelingen eksponentiel, $C = 2$ giver Rayleigh fordelingen og $C = 3.5$ giver tilnærmet en normalfordeling (Gaussfordeling). For de fordelinger, der har været anvendt til konstruktion af Vindatlasen, ligger C mellem 1.5 og 2.6 og ofte nær 2.0.

Den akkumulerede Weibull fordelingsfunktion fås ved integration af lign. (C6) til

$$F(V) = 1 - \exp(-aV^C) \quad (C7)$$

Der er det specielle ved Weibull fordelingen, at når V er Weibull fordelt, så er V^m det også med parametrene

$$a_m = a$$

$$C_m = \frac{C}{m}$$

og en akkumuleret fordelingsfunktion

$$F_m(Y) = 1 - \exp\left(-aY^{\frac{C}{m}}\right).$$

De vigtigste størrelser fra Weibull fordelingen er:

skalafaktor $A = \left(\frac{1}{a}\right)^{\frac{1}{C}}$

akkumuleret fordeling $F(V) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V}{A}\right)^C\right)$

middelværdi $M = A\Gamma\left(1 + \frac{1}{C}\right)$

middelkvadrat $\langle V^2 \rangle = A^2\Gamma\left(1 + \frac{2}{C}\right)$

varians $A^2\left(\Gamma\left(1 + \frac{2}{C}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{C}\right)\right)$

modalværdi $A\left(\frac{C-1}{C}\right)^{\frac{1}{C}}$

medianværdi $A(\ln 2)^{\frac{1}{C}}$ (C8)

$V^m \cdot \text{Pr}(V)$ har maximum for V lig med $A\left(\frac{C-1+m}{C}\right)^{\frac{1}{C}}$.

$\Gamma(X)$ er gammafunktionen defineret ved

$$\Gamma(X) = \int_0^{\infty} \xi^{X-1} \exp(-\xi) d\xi$$

og hvor $\Gamma(X+1) = X\Gamma(X)$ og $\Gamma(n) = (n-1)!$,

hvor X er et reelt tal og n er et positivt heltal.

APPENDIKS D

Sammenligninger mellem beregnede og observerede hyppighedsfordelinger.

I dette appendiks er vist sammenligninger mellem hyppighedsfordelinger af vindhastigheden målt på en række stationer jævnt fordelt over Danmark og de tilsvarende fordelinger beregnet ved hjælp af Vindatlasset. Vi har til dette formål udvalgt otte flyvestationer og meteorologistationerne på Risø og Sprogø. Flyvestationerne er valgt, fordi der herfra foreligger lange måleserier af god kvalitet, målt som 10 minutters middelværdier i 10 meters højde over rimeligt veldefineret terræn. Målingerne fra meteorologimasterne er valgt, fordi Weibull parametrenes beregnede variation med højden her kan sammenlignes med målinger. Masten på Sprogø i Storebælt har desuden en næsten ideel placering med åbent vand i alle retninger på nær vestsektoren, hvilket gør den velegnet til at sammenligne Vindatlassets beregninger med målinger over vandområder.

I de efterfølgende sammenligninger er for hver enkelt station anført hvilken periode observationerne dækker samt en kort beskrivelse af terrænet omkring vindmåleren. På de viste sammenlignende figurer fremstår de observerede vindfordelinger som histogrammer af vindhastighedens hyppighed i intervaller af længden 1 ms^{-1} . De beregnede Weibull fordelinger er vist som kontinuerte kurver, der ved ideel overensstemmelse skal skære igennem midtpunkterne af de observerede trappekurver. På figurerne er angivet de anvendte ruhedsklasser for hver sektor, og i de tilfælde, hvor der er betragtet ruhedsskift i en eller flere sektorer, er der desuden angivet afstanden til ruhedsskiftet i km og hvilken ruhedsklasse, der er anvendt opstrøms for ruhedsskiftet.

Ålborg Lufthavn

Perioden 1/1 1965 til 31/12 1977 (hele perioden), højde 10 m.

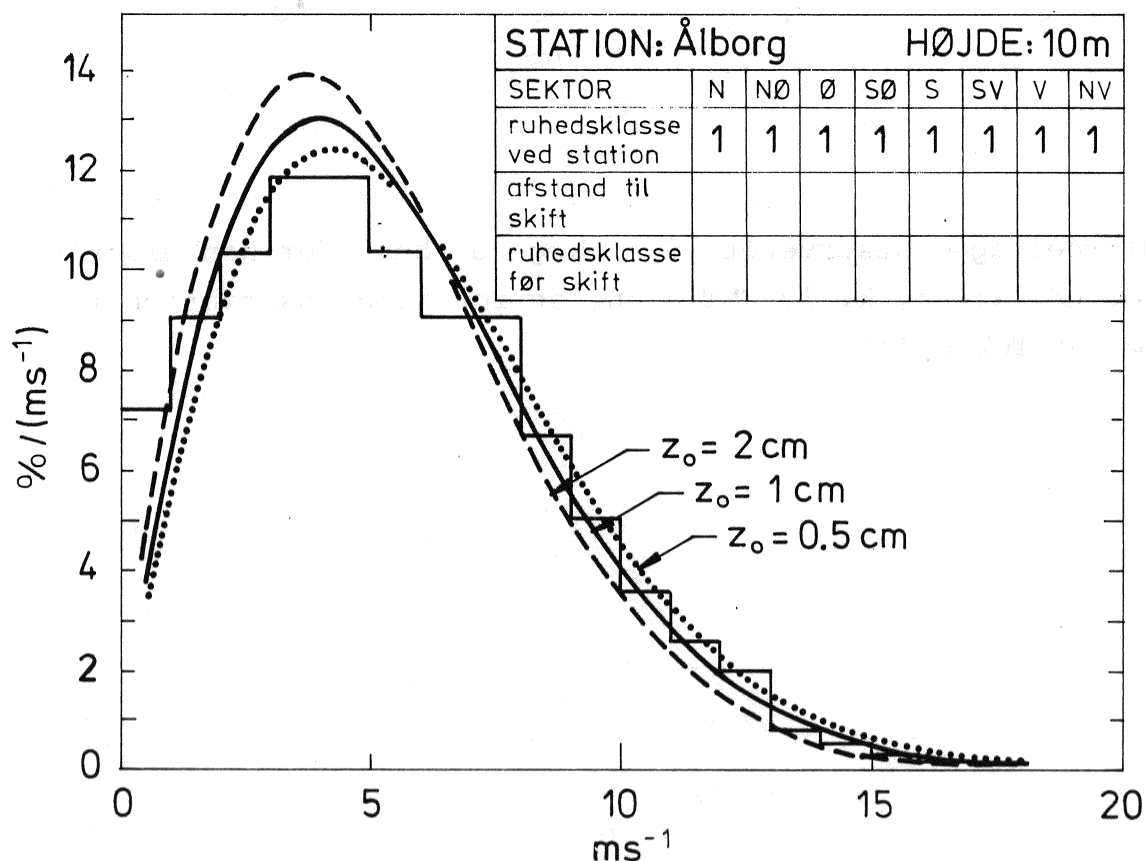
Måleren er anbragt i homogent område, græsmark med enkelte buske og træer, d.v.s. ruhedsklasse 1. Vi betragter denne måleserie som den bedste blandt flyvestationsmålingerne til sammenligning for et område med ensartet ruhed. Udover sammenligningen, der fremgår af den første figur, er der yderligere en figur til illustration af forskelle imellem hyppigheder målt om natten og om dagen.

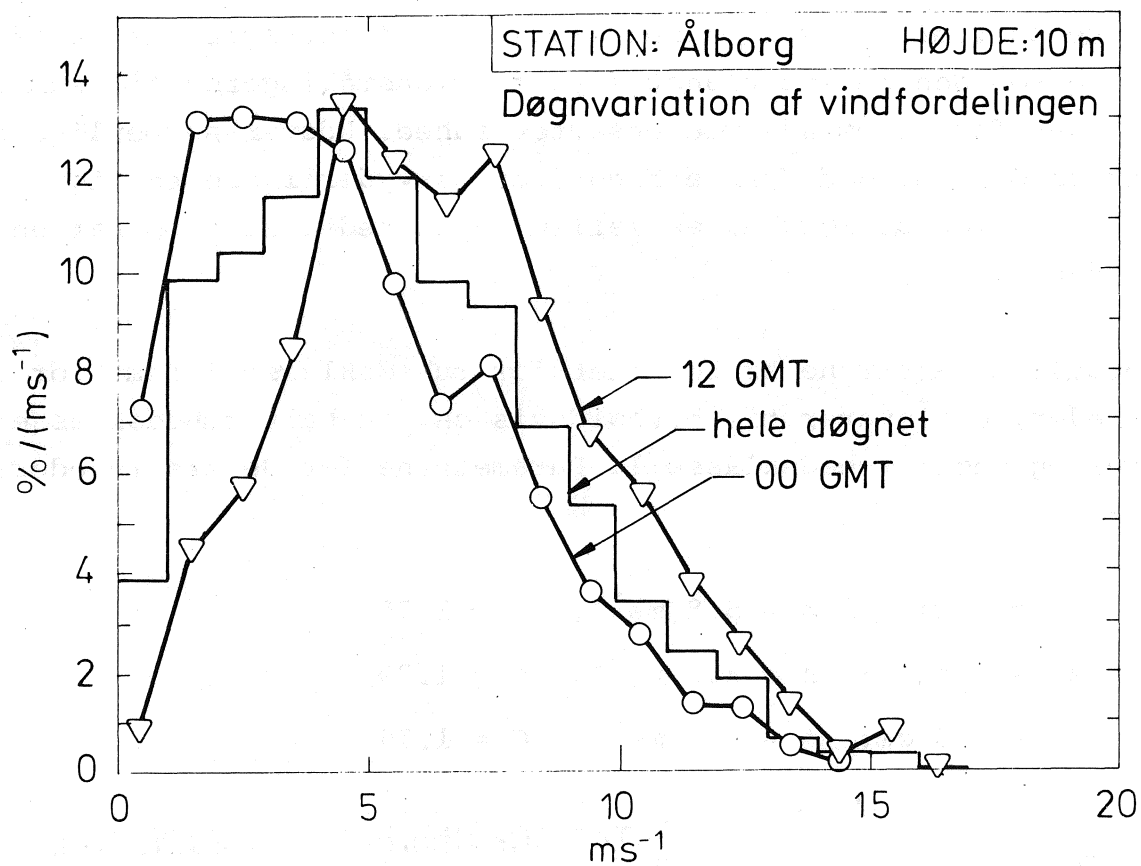
Weibull parametrene er beregnet for ruhedsklasse 1 samt for to ruheder, der svarer til henholdsvis ca. en halv ruhedsklasse over og under ruhedsklasse 1. Parametrene for de tre ruheder er:

$$z_o = 2 \text{ cm} : A = 5.8 \text{ ms}^{-1}, C = 1.79$$

$$z_o = 1 \text{ cm} : A = 6.2 \text{ ms}^{-1}, C = 1.79$$

$$z_o = 0.5 \text{ cm} : A = 6.5 \text{ ms}^{-1}, C = 1.79$$





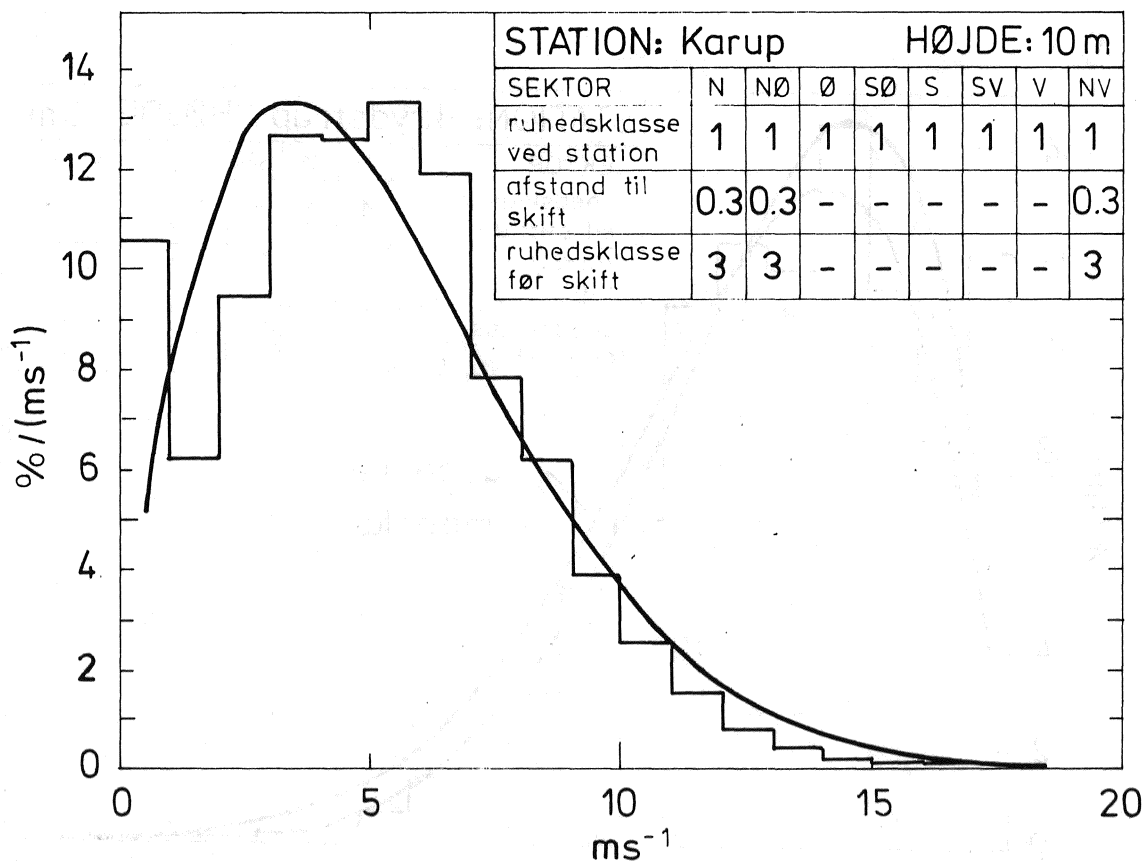
Vindfordelingen observeret på Ålborg Lufthavn for henholdsvis kl. 00 GMT alene, kl 12 GMT alene og for alle observationer (beregnet for 6 år).

Flyvestation Karup

Periode 1/10 1971 til 31/12 1977, højde 10 m.

Ruhedsklasse 1 benyttes i alle sektorer. I sektorerne NV-N-NØ er der sammenhængende træbevoksning, og vi betragter derfor et ruhedsskift i disse tre sektorer i afstanden 300 m.

Weibull parametrene bliver: $A = 5.86 \text{ ms}^{-1}$, $C = 1.69$.



Flyvestation Skrydstrup

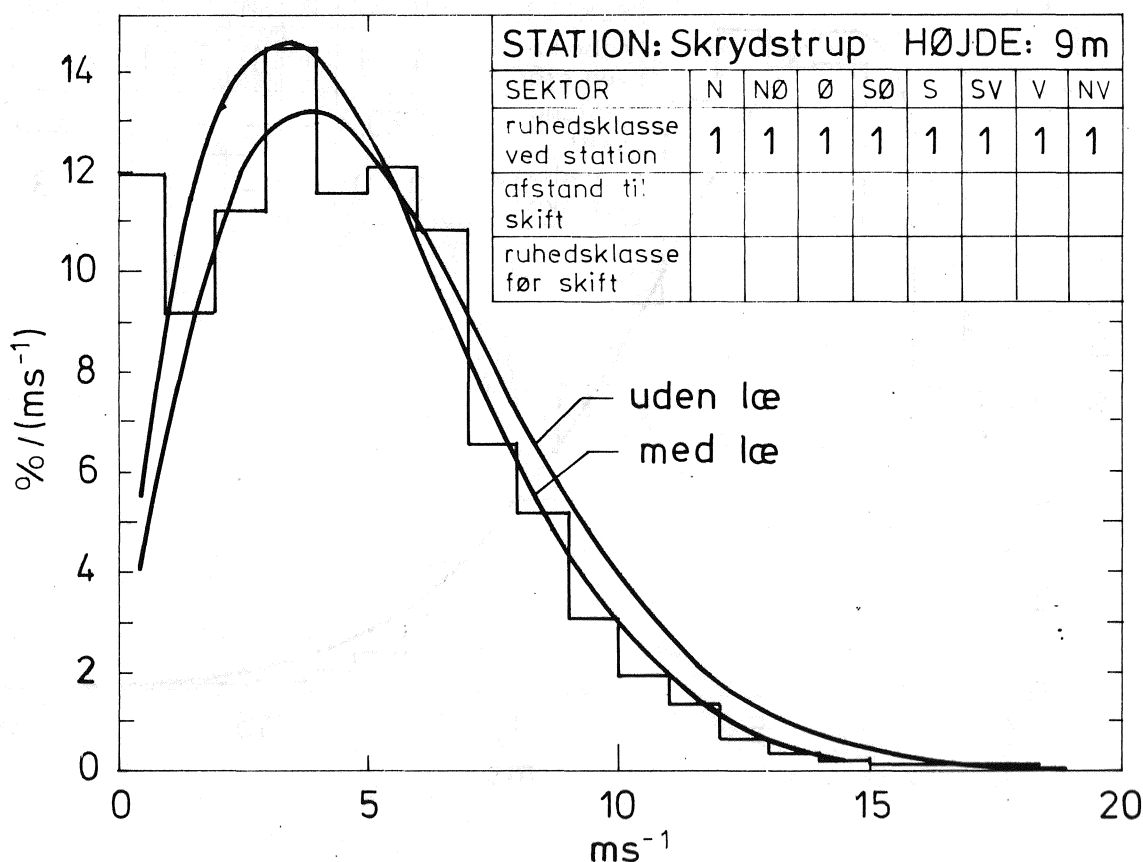
Periode 1/9 1969 til 31/12 1977, højde 9 m.

Terrænet omkring måleren er en flad græsmark, og vi må benytte ruhedsklasse 1. I relativ nærhed af måleren (~ 200 m) er der dog i nogle sektorer en del forhindringer i form af bygninger og trærækker, som giver læeffekt. Beregningen af Weibull parametrene med hensyntagen til læ er vist i eksempel 3.6.

Weibull parametrene bliver:

Uden læreduktion: $A = 6.07 \text{ ms}^{-1}$, $C = 1.78$

Med læreduktion : $A = 5.40 \text{ ms}^{-1}$, $C = 1.71$



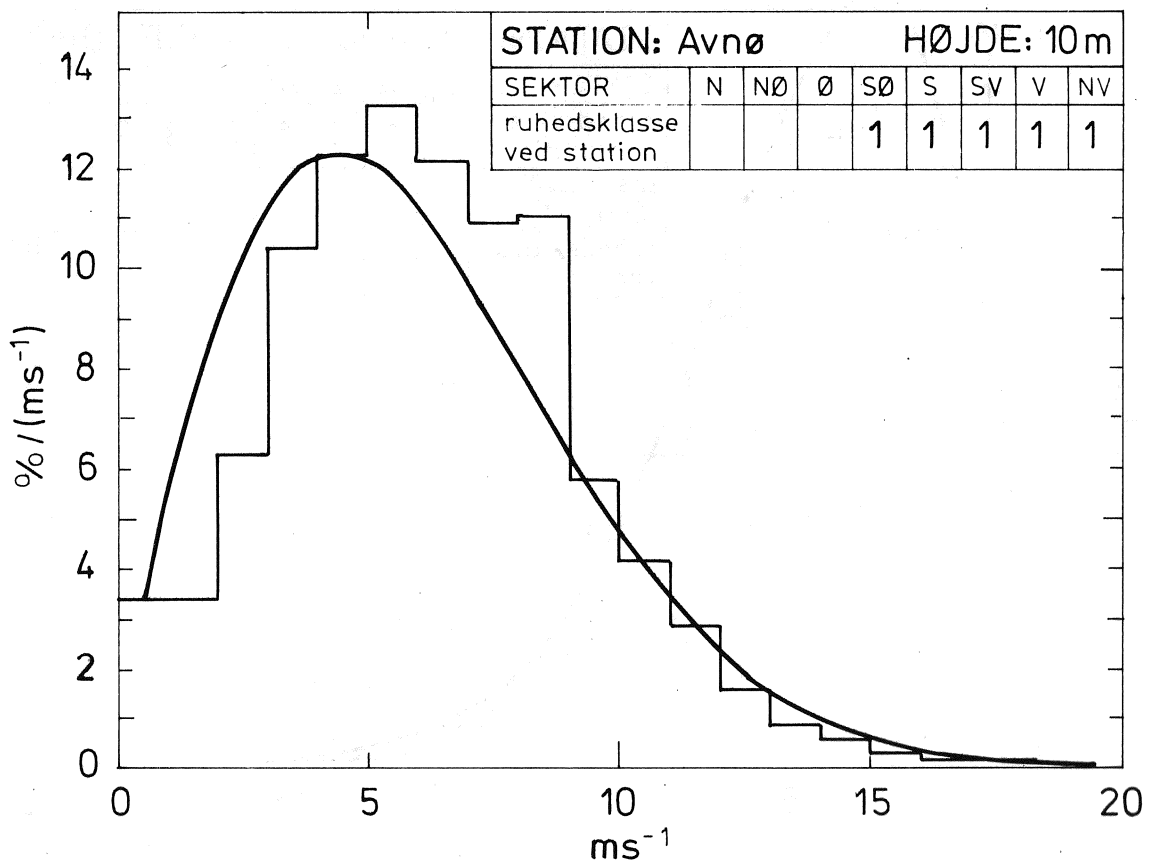
Flyvestation Avnø

Periode 1970 - 1977, målehøjde 10 m. Ingen obs. 00 og 03 GMT.

Der er forhindringer i sektorerne N, NØ og Ø. I alle andre sektorer er terrænet en flad græsmark uden forhindringer. Stationen observerer ikke om natten, hvilket kan være årsag til de store afvigelser, jfr. den viste døgnvariation af vindfordelingen for station Ålborg.

Vi benytter ruhedsklasse 1 i sektorerne SØ, S, SV, V og NV. Den observerede samlede hyppighed for disse sektorer er 71% og Vindatlasset giver 72%.

Weibull parametrene bliver: $A = 6.6 \text{ ms}^{-1}$, $C = 1.83$.



Flyvestation Værløse

Periode 10/1 1972 til 31/12 1977, højde 10 m.

Vi benytter ruhed 1 cm i alle sektorer, men må betragte ruhedsskift i sektorerne SØ, S og SV, idet måleren her er relativt nær flyvepladsens grænse. Udenfor flyvepladsen er i samme sektorer terrænet meget afvekslende med skov, samlet bebyggelse (Jonstrup og Måløv), en del spredt bebyggelse og spredte læhegn. Det må karakteriseres som nærmest klasse 3, men dog klasse 2 i visse retninger. Vi har derfor valgt at beregne resultatet for begge valg af ruheden udenfor flyvepladsen i de tre sektorer. Den bedste sektor med hensyn til ensartet ruhed er vestsektoren, og vi har derfor specielt betragtet denne sektor.

Weibull parametrene bliver:

- 1) Vestsektor alene, ruhedsklasse 1: $A = 7.1 \text{ ms}^{-1}$, $C = 1.91$,
 $f_V = 18.8\%$
- 2) Alle sektorer, ruhedsskift i SØ, S og SV i afstanden henholdsvis 700, 700 og 500 m til ruhedsklasse 2: $A = 5.9 \text{ ms}^{-1}$,
 $C = 1.80$
- 3) Som 2) men skift til ruhedsklasse 3 i SØ, S og SV:
 $A = 5.6 \text{ ms}^{-1}$, $C = 1.78$.

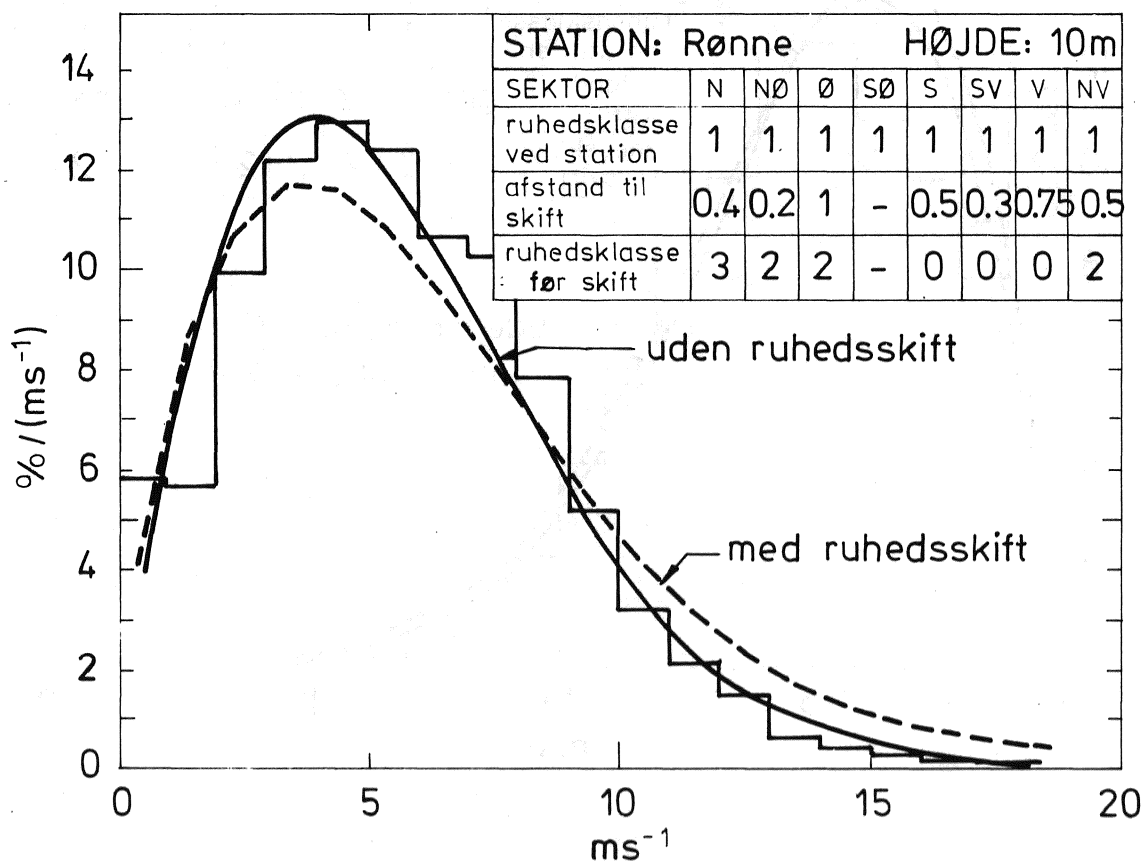
Rønne lufthavn

Periode 1/1 1965 - 31/12 1977, højde 10 m. Ingen obs. 00 og 03 GMT.

Måleren befinder sig over område af ruhedsklasse 1. Imidlertid kompliceres terrænet af, at der i afstanden 300 m mod sydvest er en ca. 20 m høj klint ned til Østersøen. I andre retninger må vi tage hensyn til ruhedsskift ved grænsen af lufthavnens område. På grund af klintens indflydelse på strømmingen er det imidlertid usikkert, om vi med rimelighed kan bruge vor ruhedsskift-beregning. Vi har vist fordelingen beregnet med ruhedsskift og også den fordeling vi får, hvis vi negligerer ruhedsskiftet.

Parametrene bliver

A = 6.2	C = 1.79	uden ruhedsskift
A = 6.7	C = 1.68	med ruhedsskift



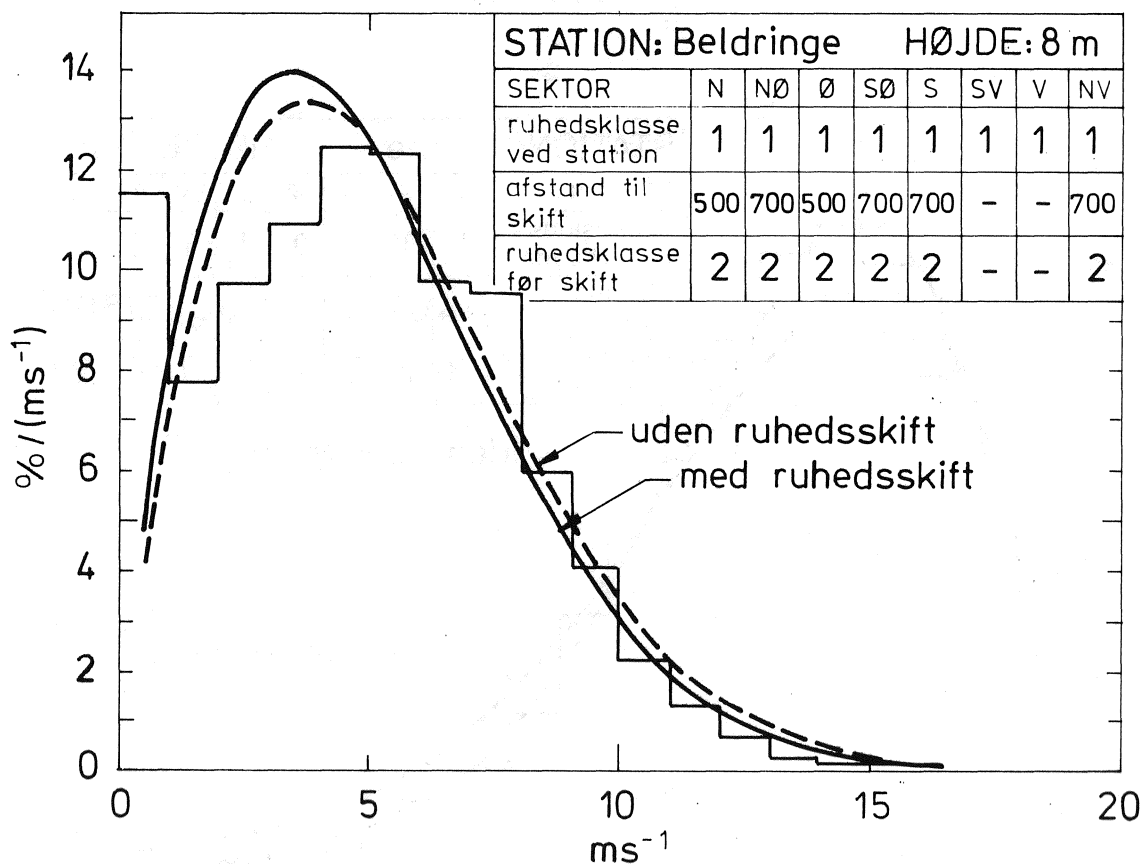
Beldringe lufthavn

Periode 1/1 1965 - 31/12 1977, højde 8 m.

Måleren er anbragt frit på en flad græsmark, og vi har derfor ruhedsklasse 1 i alle sektorer. Udenfor lufthavnens område må vi regne med ruhedsklasse 2, og vi har derfor beregnet Weibull parametrene under antagelse af, at vi har et ruhedsskift til ruhedsklasse 2 i de afstande, der er angivet på figuren. Vi har desuden vist fordelingen uden ruhedsskiftskorrektion.

Weibull parametrene bliver:

$A = 5.6 \text{ ms}^{-1}$	$C = 1.73$	med ruhedsskift
$A = 5.9 \text{ ms}^{-1}$	$C = 1.77$	uden ruhedsskift



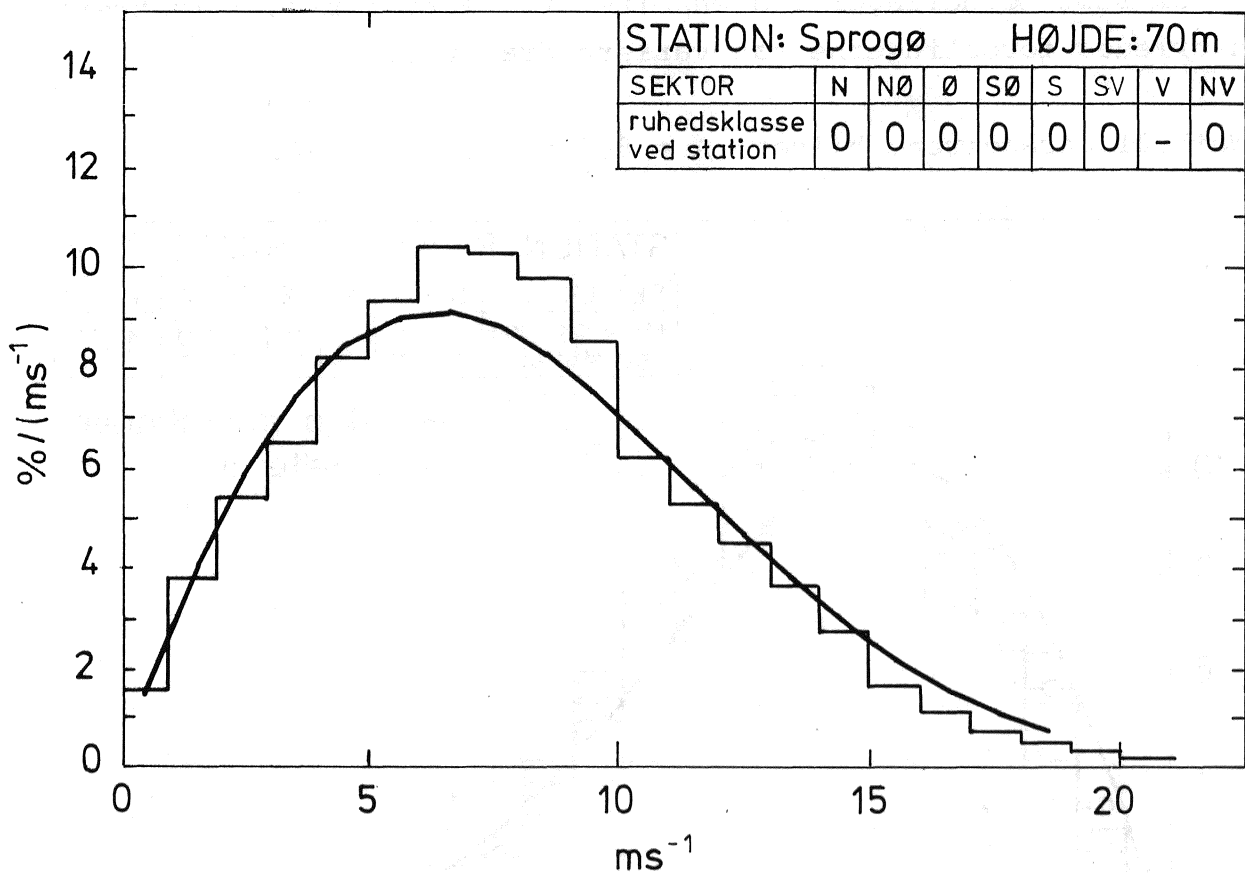
Sprogø mast

Periode 13/9 1977 - 12/1 1979, højde 70 m.

Masten er placeret på østspidsen af Sprogø med åbent vand i alle sektorer på nær vest, hvor øen må forventes at påvirke strømningen. Vi har derfor valgt at sammenligne fordelingerne for alle sektorer minus vestsektoren. De beregnede parametre bliver

$$A = 9.2 \quad C = 1.92 \quad f = 80.2\%$$

den observerede hyppighed i de pågældende sektorer er til sammenligning 82%.

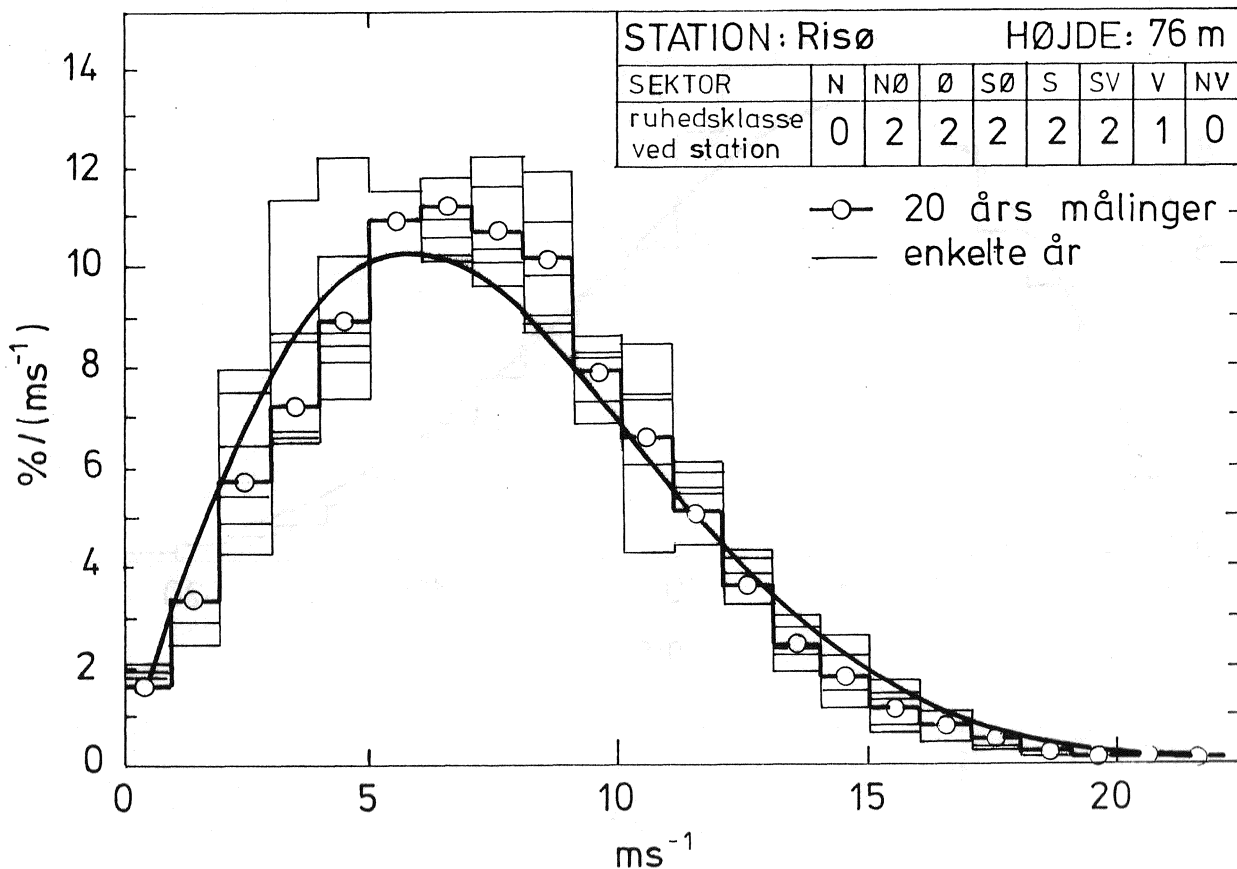


Risø mast

Periode 1958 - 1978, højde 76 m.

Risø masten er anbragt i et temmelig kompliceret terræn på østkysten af Roskilde Fjord. Med Vindatlassets ruhedsklassifikation får vi ruhedsklasser som det fremgår af figuren. Vi har anvendt ruhedsklasse 2 i de sektorer, hvor vindhastigheden i den pågældende højde må forventes at være bestemt af landruheden; i de fleste af disse sektorer passerer strømmingen over vand på det sidste stykke op til masten, men strækningen er for lille, til at vi kan forvente nogen effekt heraf i den pågældende højde. I vestsektoren har vi anvendt ruhedsklasse 1, idet vi må forvente, at vindhastigheden her er påvirket både af fjordens ruhed og af ruheden på den modsatte bred. På figuren har vi vist den beregnede fordeling sammen med middelfordelingen over 20 år samt fordelinger fra enkelte år. Dette for at illustrere hvorledes fordelingerne kan variere fra år til år.

Weibull parametrene bliver: $A = 8.3 \text{ ms}^{-1}$, $C = 1.96$.



APPENDIKS E

Årstidsvariation af energiproduktion.

På grundlag af tidsserien af produktion, som anvendtes til beregning af varighedsstatistikken beskrevet i appendiks D, er regnet, hvorledes den forventede månedsmiddelproduktion ændres gennem året. På figur E1 er vist den procentvise afvigelse af månedsmiddeleffekten fra middelværdien samt standardafvigelsen af månedsmiddelværdierne fra de enkelte år.

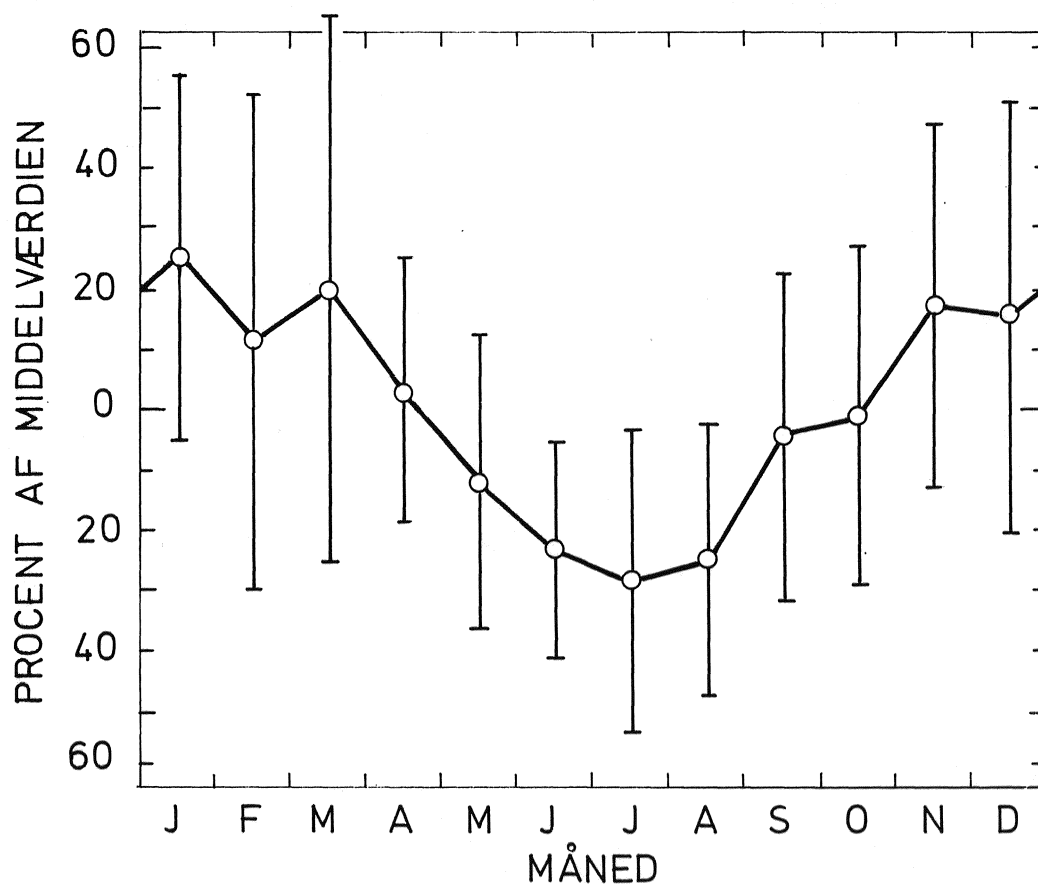


Fig. E1. Afvigelse i procent af månedsmiddelproduktion relativt til middelværdien samt standardafvigelsen angivet som stave af længde to gange standardafvigelsen.